

地磁気環境下での磁気計測の精度向上と移動式磁気計測システム構築に関する研究

著者	川野 広志
その他のタイトル	Study on Precision Improvement of Magnetic Measurement under Geomagnetism Environment and Mobile Magnetic Measurement System Construction
学位授与年度	平成29年度
学位授与番号	17104甲工第441号
URL	http://hdl.handle.net/10228/00006707

博士学位論文

地磁気環境下での磁気計測の精度向上と 移動式磁気計測システム構築に関する研究

九州工業大学大学院

工学府 工学専攻

川野 広志

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.1.1 微弱な磁気計測に用いる磁気センサ	2
1.1.2 フラックスゲート磁気センサによる磁気計測	2
1.1.3 不発弾探査の現状	3
1.1.4 磁気分布計測の現状	4
1.2 磁気センサを移動させて行う磁気計測	5
1.3 磁気計測のための移動装置	7
1.4 本研究の目的	8
1.5 本論文の構成	8
参考文献	10
第2章 フィルタリングを用いた磁気探査装置の不発弾検出性能の向上	13
2.1 緒言	13
2.2 磁気探査装置の現状と課題	13
2.3 誤検知を改善するためのシミュレーション条件の設定	14
2.4 提案する手法	18
2.5 フィルタリングによる演算実験	21
2.5.1 DOD 関数フィルタリングによる結果と考察	21
2.5.2 DOD 関数と DOG 関数フィルタリングによる結果と考察	25
2.6 不発弾検出性能の向上のまとめ	33
2.7 不整地での探査作業	33
2.8 結言	35
参考文献	36
第3章 レーザによる測位を利用した移動式磁気計測手法の検討と分析	37
3.1 緒言	37
3.2 移動式磁気計測手法の検討	37
3.3 目的とする移動式磁気計測の精度	39
3.4 提案する手法	40
3.5 目測による回転角の取得実験	43
3.6 目測による回転角の取得実験結果と考察	46
3.7 結言	50
参考文献	51

第4章 姿勢情報取得システムの開発と移動式磁気計測システムの評価	52
4.1 緒言	52
4.2 姿勢情報取得システムの検討	52
4.3 提案する姿勢情報取得システムの手法	53
4.4 姿勢情報取得システムの性能評価実験と結果考察	63
4.5 移動式磁気計測システムの性能評価実験と結果考察	66
4.6 結言	68
参考文献	69
第5章 移動装置の検討とコントローラ用タッチパネルスイッチの研究開発	70
5.1 緒言	70
5.2 移動装置及びコントローラの検討	70
5.3 入力用インターフェイスの検討	74
5.4 提案する手法	75
5.5 性能評価実験	81
5.5.1 タッチパネル位置の確認実験の結果と考察	81
5.5.2 最大パネル枚数検証実験の結果と考察	83
5.6 結言	87
参考文献	88
第6章 移動式磁気計測システムの実用化に向けた検討	90
6.1 緒言	90
6.2 手動による移動式磁気計測システムの実用化検討	90
6.3 ドローンを使用した移動式磁気計測システムの検討	93
6.4 結言	96
参考文献	97
第7章 結論	98
7.1 結論	98
謝辞	100

第 1 章 序論

1.1 本研究の背景

磁気とは古くは紀元前に磁石としてその存在を知られ、その後は方位磁石としての広く利用され 17 世紀には地球が大きな磁石であり地磁気を保持していることが発見された^(1,2)。地磁気の強さは地域により異なるが日本国内においてはおよそ $35\sim 45\mu\text{T}$ 程度となる⁽³⁾。19 世紀には電気と磁気の関係の解明が進み、20 世紀初頭には量子力学による物質の磁性の解明が行われた。このように、磁気について解明が進むのに伴い、磁気を測定するための様々な磁気センサが開発され現在も利用されている。代表的な磁気センサには電磁誘導を用いるサーチコイル磁気センサ⁽⁴⁾、半導体のホール効果を用いるホール素子磁気センサ⁽⁵⁾、軟磁性材の急峻な可飽和特性を利用するフラックスゲート磁気センサ⁽⁶⁾、超電導を用いた SQUID 磁気センサ⁽⁷⁾等がある。磁気センサは一部を除いてその検出方向による指向性を持っており、単体使用で 1 軸磁気センサ、3 個を X,Y,Z 軸で組み合わせて 3 軸磁気センサとして使用される。これらの磁気センサは磁気計測の目的に合わせて使い分けられている。例えば、サーチコイル磁気センサは電力送電線や変電設備などの交流磁界の磁気計測、ホール素子磁気センサはリレーや永久磁石などの磁気計測、SQUID 磁気センサは心磁計、脳磁計などに用いられている。フラックスゲート磁気センサは主に地磁気以下の磁気計測に用いられている。以降、地磁気以下の磁気を微弱な磁気と呼ぶ。近年、不発弾探査の徹底や磁気の影響を受ける装置の増加に伴い、微弱な磁気領域における環境磁気計測や対象物の持つ磁気分布計測の必要性が増加している。そこで、本研究では磁気センサを移動させて行う微弱な磁気

計測技術について検討を行う。さらに、実用化に向けて磁気センサの移動装置や操縦用インターフェイスの検討を行う。

1.1.1 微弱な磁気計測に用いる磁気センサ

現在、地磁気的环境下における微弱な磁気計測では、フラックスゲート磁気センサを使用して計測する場合が多い。その理由は他の磁気センサに比べフラックスゲート磁気センサが微弱な磁気計測に適しているためである。まずホール素子磁気センサはフラックスゲート磁気センサと装置の価格帯は変わらないが、主に永久磁石などの地磁気の 1000 倍以上の磁気の強さの領域での磁気計測が最適領域であり、目的の磁気計測と領域が異なっている。特に微弱な磁気領域ではゼロ点の温度ドリフトが顕著に表れるため使用に適さない⁽⁸⁾。SQUID 磁気センサはフラックスゲート磁気センサよりもはるかに高分解能であるが、超電導現象を利用しているなど、他の磁気センサと比べ磁気計測に大きなコスト必要になる⁽⁹⁾。サーチコイル磁気センサは微弱な磁気領域での計測が適応領域でかつ、他の磁気センサと比べ安価である場合も多いが、交流磁気の計測に適しており直流磁気計測には不向きである⁽¹⁰⁾。これらの理由から微弱な磁気領域での様々な磁気計測にはフラックスゲート磁気センサが適しており、用いられるフラックスゲート磁気センサの分解能は 1~10nT 程度である。そこで、本研究ではこのフラックスゲート磁気センサを用いて磁気計測技術の研究を行う。以降、磁気センサとはフラックスゲート磁気センサを指すものとする。

1.1.2 フラックスゲート磁気センサによる磁気計測

フラックスゲート磁気センサを用いた磁気計測は、天体、火山、地質関連などの磁気計測や、建物建設前の事前調査などの磁気計測、磁性体の残留磁気の計測、不発弾などの探知、機器が外部に向けて発生する磁気の

計測など、その目的と種類は多岐にわたる。

地磁気的环境下で行われる磁気計測の中で代表的な事例が不発弾探査である。特に沖縄県で多く実施されている不発弾探査であるが、近年では日本全国においても不発弾探査が求められている。特に高度成長期に開発された都市部の再開発などにおいて、今まで発見されていなかった不発弾が見つかる事例も増えている。

次に、磁気に影響を受ける装置に対して外乱となる微弱な磁気を確認、管理するために行われる磁気計測が近年増加している⁽¹¹⁻¹⁴⁾。磁気に影響を受ける装置で代表的なものは方位磁石、電子コンパス、電子顕微鏡や 3D プリンタ、半導体製造装置などの電子ビームを使用した装置、磁気によって画像を取得する MRI 装置などがあげられる。これらの装置は性能の向上や装置の多様化、電子コンパスではサイズ小型化に伴い様々な機器に組み込まれるなどすることで、その数は年々増加している。これらの装置は使用に際して、他の装置が悪影響を与える磁気を発生していないか確認するため、周辺装置や関連装置などが持つ磁気分布の計測などが求められる。これらの計測は、関連装置毎に管理される必要があるため、その種類の分だけ磁気計測の機会が存在することになる。

1.1.3 不発弾探査の現状

第二次世界大戦中、大規模な空襲により日本には多くの爆弾が投下された。その全てが爆発したわけではなく、爆発しなかった爆弾は不発弾と呼ばれている。特に激しい地上戦が行われた沖縄県においては、航空機爆弾、艦砲射撃、陸上砲撃による不発弾が未だ身近に存在している⁽¹⁵⁻¹⁶⁾。この理由から沖縄県では、安全を保つため不発弾の探査が頻繁に行われている⁽¹⁷⁻¹⁸⁾。

この磁気センサを使った磁気探査装置による不発弾探査の問題として、都市部再開発時の誤検知の問題と、郊外の不整地での作業効率の問題がある。誤検知の問題とは、探査領域に隣接する構造物に使用されている強磁性体によって頻発する不発弾の誤検知のことである。隣接する構造物からの磁気に反応して磁気センサの出力が増加し、場合によっては不発弾よりも大きな反応を検出する。その結果、誤った位置に不発弾があると判断してしまい、誤検知が発生する。

次に、郊外での作業効率の問題がある。現状の不発弾探査は作業者が磁気センサ部を携帯し徒歩で探査している。郊外、特にまだ重機などが入っていない不整地での不発弾探査においては、荒れ地やぬかるんだ土地など作業者に高負荷がかかる状況が多く、作業効率が大幅に低下する。本論文では、磁気探査装置の磁気センサ部の S/N 比向上による誤検知の改善を行い、誤検知問題を解決する。また、不整地での作業効率改善に向けた、不発弾探査のための磁気計測手法の検討を行う。作業効率の改善では磁気探査装置の磁気センサ部の構造に起因する磁気センサ部のサイズ問題がある。その問題解決のため単一の磁気センサを使用した移動式の磁気分布計測について研究を行う。

1.1.4 磁気分布計測の現状

磁気の影響を受ける装置の増加に伴い、微弱な磁気領域での磁気計測の必要性が増加している。この磁気計測では周辺装置や関連装置などが持つ磁気分布の高精度な計測が求められる。それに対して、測定対象物の持つ磁気分布計測の基本的手法は磁気センサそのものの高性能化や小型化、解析能力の向上といったことを除き、大きな進化、変化をしていない。基本的手法とは磁気センサを固定して、測定対象物を移動させて行う従来型の

磁気計測手法である。これは、地球上に地磁気が存在することがその大きな理由であると考えられる。天文学では地磁気の極が逆転するなど地磁気の変化が考慮される。しかし、人類の歴史で考えればここ数千年にわたり地磁気はほぼ不変であると考えることができる⁽¹⁹⁾。この不変的に存在する地磁気が微弱な磁気計測に大きな制約を与えている。例えば、ある特定の場所の磁気を長時間計測する環境磁気計測では、測定場所に磁気センサを固定して環境磁気の変化を計測する手法が一般的である。この場合、磁気センサが動かないので地磁気は日変動分（約 10nT/日）を除き一定とみなせる、そのため高精度に環境磁気の計測が可能である。これに対して、磁気センサを移動させて行う微弱な磁気計測は、動くたび常に磁気センサが地磁気に反応し、X,Y,Z 各軸の出力値が大きく変化してしまうため、地磁気環境下での実施は困難である。つまり、測定対象物の微弱な磁気分布を求める磁気計測は、磁気センサを移動させて計測するのが最も効率的であるが、上記の理由により環境磁気計測と同様に磁気センサを固定し、測定対象物側を移動装置に乗せて動かす手法で長年行われてきた。しかしながら、この方法にはいくつか問題がある。移動装置や治具が鉄や鋼といった強磁性材料で構成される場合、磁気計測に誤差が生じる。そこで、これらは非磁性材料で設計される必要がる⁽²⁰⁾。そのため、対象物が人に運べない程度に大きく重くなると、移動装置の設計に際して強度やコストといった様々な問題が発生する。そこで、本研究では測定対象物の微弱な磁気分布を、1.1.2 でもあげた磁気センサを移動させて行う磁気計測で取得することで、問題解決を図る。

1.2 磁気センサを移動させて行う磁気計測

地磁気環境下で磁気センサを移動させて行う磁気計測はまったく行わ

れていないというわけではない。地磁気の影響を無視、除去、あるいは遮蔽するなどの対策を行うことで、磁気センサを移動させながら微弱な磁気計測は可能になる。その方法は磁気センサを動かして磁気計測する際に、磁気計測のデータを全磁力で評価するか、磁気シールドと呼ばれる技術を利用する。これにより、磁気センサを移動させながら微弱な磁気計測が可能になる。しかしながら、これらの手法では移動しながら行う微弱な磁気計測に対する問題を解決するに至っていない。

まず、全磁力による評価では磁気センサを地磁気中で移動させる磁気計測が可能である。地磁気的环境下で三軸磁気センサを動かしても全磁力は変化しない、つまり固定値として無視することができる。しかし、X,Y,Z各軸の磁気成分を評価することはできない。そのため、各軸の磁気成分の正確な評価が求められる、不発弾などを含む測定対象物の持つ磁気分布の計測で用いることはできない。そのため、不発弾の探査では採用されておらず、主に火山や地層など大規模で一様な磁気を計測する際に用いられている⁽²¹⁾。

もう一つの手法が磁気シールドである。磁気シールドにはパッシブ磁気シールドとアクティブ磁気シールドが存在する。パッシブ磁気シールドとは主に高透磁率材料によって囲われた空間によって構成されている⁽²²⁾。中でも人間が磁気計測を行えるほど大きな空間を得られるものを磁気シールドルームという。微弱な磁気計測を行える磁気シールドルーム内部において、地磁気は数百～数千分の一に減衰され、磁気センサを自由に動かしながら測定対象物の持つ磁気分布の正確な計測が可能である。しかしながら、磁気シールドルームに使用される材料はパーマロイ合金やアモルファス合金である。これらの金属材料は大変高価であり、その上接合部など

では専門技術に基づく高度な設計と組み立て技術が要求される。そのため、地磁気を数百分の一する性能の 2m 立方程度の磁気シールドルームでも数千万円という価格になる⁽²³⁾。このように磁気シールドルームは地磁気の影響を遮蔽できる性能を有するが、大変に高価であり簡単に用意はできない。続いて、アクティブ磁気シールドは、パッシブ磁気シールドと比べ価格は大幅に安価である。アクティブ磁気シールドは安価なコイルと磁気センサで構成され、地磁気を数百分の一に減衰できる性能を有している⁽²⁴⁾。しかし、アクティブ磁気シールドでは磁気シールドの有効エリアが磁気シールドルームと比べてとても狭いという問題がある。そのため、磁気シールドルームと同等の有効エリアを得るには、磁気シールドルームのおおよそ 10 倍程度のサイズのコイルが必要となる。コイルの強度や建屋の問題も考えられるため、アクティブ磁気シールド内での磁気センサを移動させる磁気計測は現実的ではない。このように、現状の磁気センサを移動させる磁気計測には様々な課題があり、測定対象物の微弱な磁気分布を求める磁気計測に用いることは難しい。そこで、本研究では測定対象物の微弱な磁気分布の計測を、磁気センサを移動させて行う磁気計測手法で実現するために必要な技術について研究を行う。

1.3 移動装置の検討

磁気センサを移動させて行う磁気計測技術を考えるとき、磁気計測ともう一つの要素が移動のための装置の検討である。移動に用いる装置は空中、地上、水中と様々考えられるが、どの装置においても課題となるのが、その操作性である。特に空中や水中は三次元での操作が必要となり、一般の操作用コントローラを使った操縦では熟練した技術が要求される場合が多い⁽²⁵⁾。そこで、磁気センサの移動のためだけに、担当者が別途に専門の操

縦技術を習得せずに済むように、容易な操縦を可能にするコントローラを検討し、またそのために必要な入力インターフェイスの研究を行う。

1.4 本研究の目的

本研究は地磁気環境下での磁気計測の精度向上と新しい磁気計測システムの開発を目的とする。これら組み合わせることで、磁気探査装置による不発弾探査の誤検知の改善だけでなく、新しい磁気計測の実現、計測関連装置の低コスト化、作業の効率化が可能となる、移動式の磁気計測システムの開発を行う。そのために必要となる簡易操作可能なコントローラに関する技術や、姿勢認識のための画像処理技術など、周辺技術の研究と磁気計測技術を融合し、新たな磁気計測システム構築に関する研究を行う。

1.5 本論文の構成

本論文では、地磁気環境下での磁気計測精度の向上を行い、微弱な磁気領域において、磁気センサを移動させながら誰でも容易に計測できる、移動式の磁気計測システムの開発を目的とする。第1章は序論であり背景や目的を明らかにする、第2章では磁気探査装置の磁気センサ部の誤検知問題の改善を行い、不整地での探査作業の課題について検討する。第3章では地磁気的环境下において磁気センサを移動させて行う磁気計測システムを実現するために必要な機能を検討する。この検討に基づき、実験試作機を製作し実験を行い、特に目標となる磁気計測の精度を達成するために求められる姿勢情報取得機能の精度について明らかにする。第4章では、3章で判明した要求性能に基づいて姿勢情報取得システムの開発を行い、姿勢情報取得システムの性能を確認する。さらにその姿勢情報取得システムを用いて実現できる移動式の磁気計測システムの性能を確認する。第5章では、移動式の磁気計測システムの移動装置についての検討を行い、移動

装置の問題点となる容易な操作コントローラ実現のため、フレキシブルなタッチパネルスイッチの研究開発を行う。第 6 章では 2-5 章の研究を融合して得られる、移動式の磁気計測システムについて実用性や用途を検討する。最後に第 7 章にて今後の課題を示し本研究で得られた成果についてまとめ論文を締めくくる。

参考文献

- [1] 内山 晉,「アドバンスト・マグネティクス」, 培風館, pp. i, 1994
- [2] 志賀正幸,「磁性入門」, 内田老鶴圃, pp. 1, 2007
- [3] 国土地理院ウェブサイト
<http://www.gsi.go.jp/common/000148086.pdf>, 「磁気図」,
国土地理院技術資料 B1-No.71
- [4] N. I. HuthA and P. L. Poulton : “An electromagnetic induction method for monitoring variation in soil moisture in agroforestry systems”, Australian Journal of Soil Research, Vol. 45, pp. 63-72, 2007
- [5] 毛利佳年雄, 「磁気センサ理工学」, コロナ社, pp.56-57, 1998
- [6] 毛利佳年雄, 「磁気センサ理工学」, コロナ社, pp.80-89, 1998
- [7] 電気学会マグネティクス技術委員会, 「磁気工学の基礎と応用」, コロナ社, pp.169-170, 1999
- [8] 日本工業規格, 「人体ばく露を考慮した低周波磁界及び電界の測定-測定器の特別要求事項及び測定の手引き」 JIS C 1910:2004, pp.66, 2004
- [9] 能登宏七, 「磁気活用技術」, 工業調査会, pp.124-146
- [10] 日本工業規格, 「人体ばく露を考慮した低周波磁界及び電界の測定-測定器の特別要求事項及び測定の手引き」 JIS C 1910:2004, pp.4-11, 2004
- [11] 森信一郎, 奥山鏡子, 峰野博史, 水野忠則, 「地磁気センサを使った高精度測位技術」, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J93-D, No.10, pp.1894-1902, 2010
- [12] 廣里成隆, 三浦一幸, 鶴田壮広, 「工事車両の移動に起因する磁気ノイズの影響検討」, 日本建築学会 学術講演梗概集, Vol.2014, pp.583-584,

2014

[13] 日本画像医療システム工業会 標準化部会標準化委員会,「MRI の Q&A」,日本画像医療システム工業会規格 JESRATR-0041-2014, pp.8-10,

2014

[14] 塚田啓二,「最近の心磁計」,低温工学・超電導学会(旧 社団法人 低温工学協会)低温工学, 42(9), pp.296-302, 2007

[15] 統合幕僚監部,「平成 24 年度災害派遣及び不発弾処理実績」,統合幕僚監部報道発表資料, pp. 8-9, 2013

[16] 沖縄県知事公室防災危機管理課,「住宅, アパート, マンションなどの建築を考えている皆様へ」, 小冊子, pp. 1-5, 2013

[17] 沖縄県不発弾等対策協議会事務局,「不発弾等爆発事故防止に向けて」, 沖縄不発弾等対策協議会説明会, pp. 3-6, 2009

[18] 内閣府沖縄総合事務局,「沖縄における不発弾対策の取り組み」, 定例会見資料, pp. 9-11, 2013

[19] 河野長, 山崎俊嗣,「特集「地磁気・古地磁気研究の最前線」について」, 地学雑誌, Vol. 114(2005) No. 2, pp.121-122, 2005

[20] 日本建築学会,「建築におけるシールド材料・施工 磁気シールド」ミマツコーポレーション, pp.34-37, 2003

[21] 橋本武志, 小山崇夫, 金子隆之, 大湊隆雄, 吉本充宏, 鈴木英一, 柳澤孝寿,「無人ヘリコプターを利用した樽前山の空中磁気測量」, 北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門(地球物理学), 北海道大学地球物理学研究報告, 第 75 号, pp.145-159, 2012

[22] 岡崎靖雄,「強磁性材料のシールド特性」, 電学誌, vo.116, No.4, pp.208-212, 1996

- [23] 日本建築学会,「建築におけるシールド材料・施工 磁気シールド」ミ
マツコーポレーション, pp.57-111, 2003
- [24] 大崎博之,「磁界の漏れ・妨害を防ぐ用件」, 電学誌, vo.116, No.4,
pp.203-207, 1996
- [25] 全国農林航空事業推進協議会,「産業用無人ヘリコプターによる病害
虫防除実施者のための安全対策マニュアル」, 農林水産航空協会, pp.1-3,
2016

第2章 フィルタリングを用いた磁気探査装置の不発弾検出性能の向上

2.1 緒言

本章では、不発弾探査に用いられる磁気探査装置について研究を行う。ここでは、磁気探査装置の誤検知問題を各種フィルタリングによる磁気計測データの解析によって解決を目指す。また、不整地での不発弾探査作業についての検討を行う。

2.2 磁気探査装置の現状と課題

まず不発弾探査には、電磁誘導方式と差動型の磁気探査方式がある。電磁誘導方式は検出範囲が約数十 cm と狭いため不発弾探査で部分的に使用される。差動型の磁気探査方式は検出範囲が 4-6m と広いため、ほとんどの不発弾探査で差動型の磁気探査方式が使用される。差動型の磁気探査方式を用いた探査装置は磁気探査装置と呼ばれる。近年の磁気探査装置による不発弾探査の問題として、探査領域に隣接する構造物に使用されている強磁性体によって頻発する不発弾の誤検知がある⁽¹⁾。磁気探査装置は 4-6m の検出範囲を持つため、隣接エリアからの磁界に反応して出力が増加し、場合によっては不発弾よりも大きな反応を検出する。その結果、探査装置は誤った位置に不発弾があると判断してしまい、誤検知が発生する⁽²⁾。この問題を解決するために、複数の差動出力を持つ磁気探査装置を開発した⁽³⁾。この方法では、複数の差動出力を用いることにより、隣接エリアから生じる磁界の影響を低減している。しかしながら未だに問題点も残されており、隣接エリアからの磁界が強い場合や、不発弾の大きさ、距離の違いによっては検出が困難な場合もある。そこで今回は、2つの差動出力の

差と DOG フィルタリングを用いることによって、不発弾成分を強調し、不発弾検出精度をさらに向上する方法を提案し、その有効性をシミュレーションにより確認する。

次に、磁気探査装置の運用上の課題を検討する。いまだに磁気探査装置は測定者が磁気センサ部を携帯し、探査エリアを測定したいラインに沿って歩行することで、探査を行っている。一日数千平方メートルの探査が行われているが、その歩行距離はかなりのものとなる。なかでも、まだ重機などが作業に入っていない未開拓の不整地での探査は困難な場合も多い。特にがれきだらけの荒地やぬかるんだ土地においては、徒歩で探査するためその作業効率は大幅に低下してしまう。この課題の解決策として移動装置を用いた磁気探査手法について検討する。

2.3 誤検知を改善するためのシミュレーション条件の設定

図 2-1 は隣接エリアからの磁界の影響を示している。図 2-1 の斜線で示した部分が、隣接する構造物からの磁界の影響によって誤検知が発生する領域である。図 2-1 の距離 d は通常 4-6m 程度である。この誤検知エリア下に不発弾がある場合を想定し、図 2-2 のシミュレーションレイアウトを設定した。ここでは線形双極子を X 軸 10m の位置に配置する。この線形双極子は長さ 8m とし、両端にそれぞれ -0.3 mWb と +0.3 mWb の極を持っている。これを隣接エリアの鉄筋とする。さらに X 軸 11m、鉄筋から Y 軸距離 2m の位置に長さ 0.4m、両端にそれぞれ -0.2 mWb と +0.2 mWb の極を持つ強磁性体を追加する。この強磁性体をテストオブジェクトと呼び、不発弾とみなす。本研究ではこのレイアウトでシミュレーションを行う。

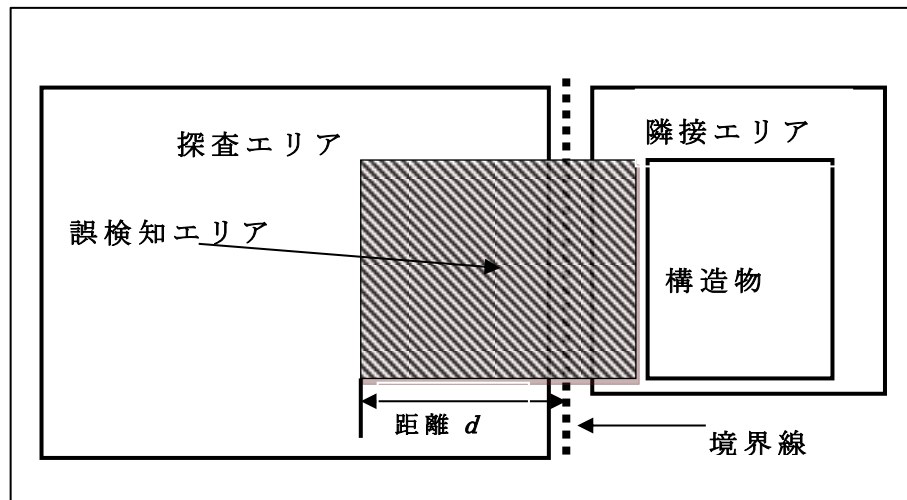


図 2-1 隣接エリアからの磁界の影響

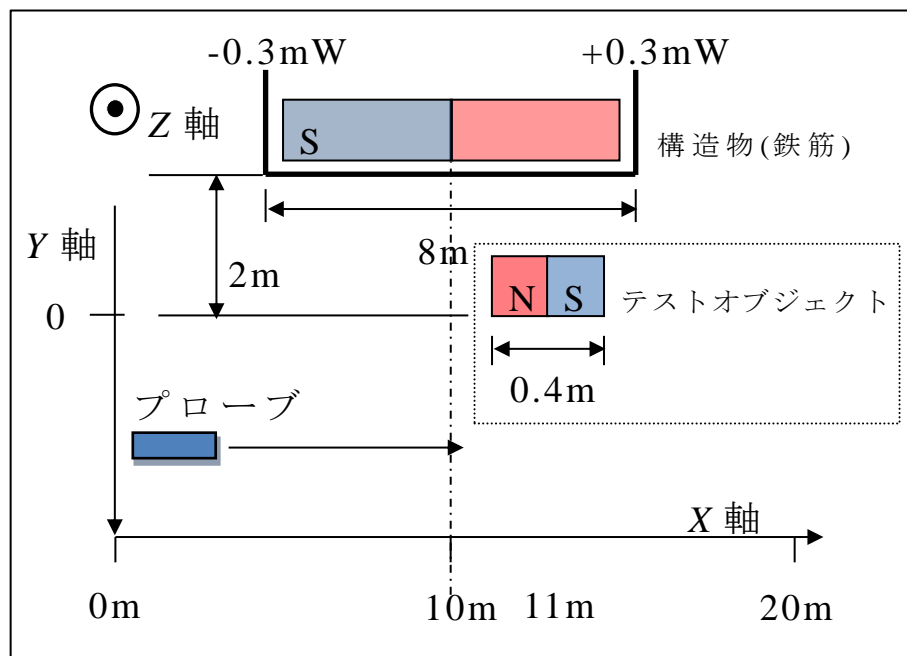


図 2-2 シミュレーションレイアウト図

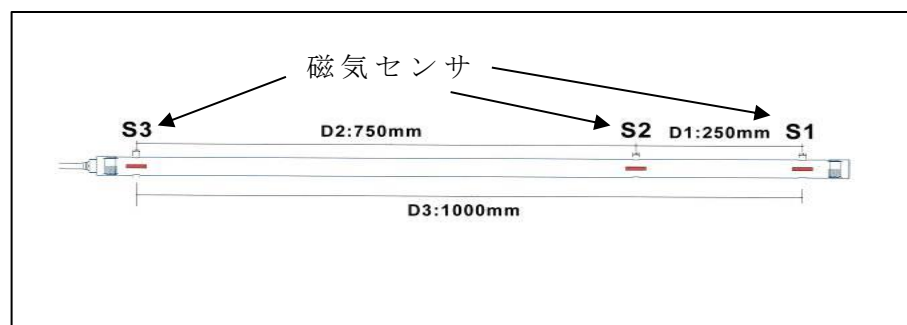
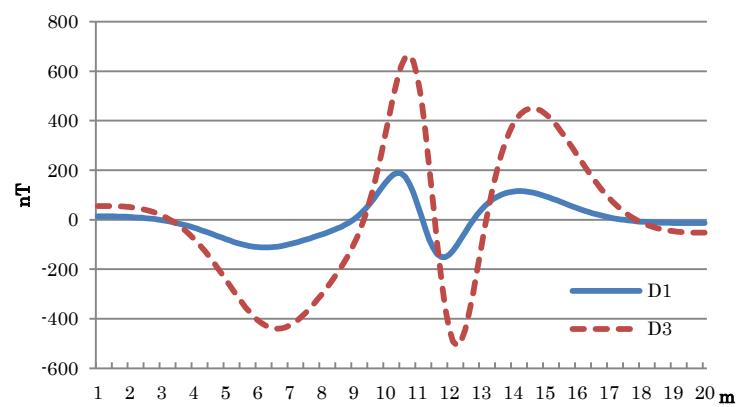
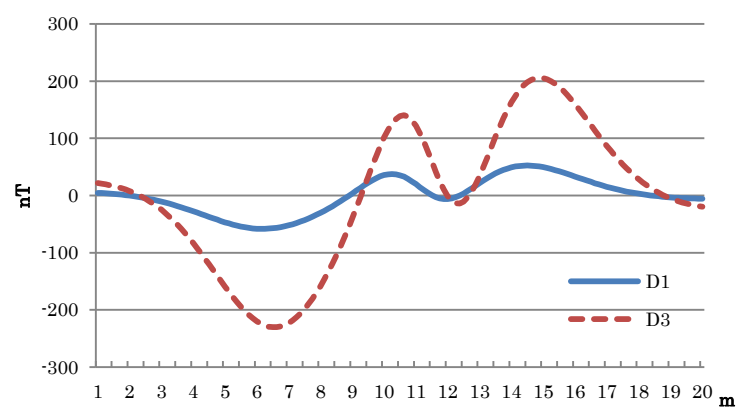


図 2-3 磁気探査装置プローブ(3)

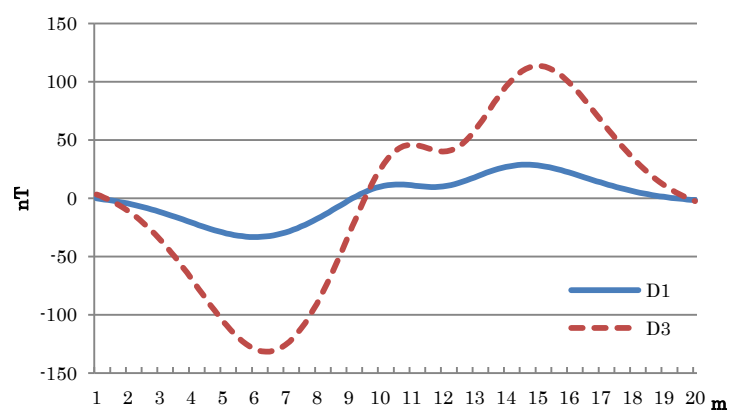
図 2-3 は磁気探査装置プローブの説明図である。図 2-2 において図 2-3 のプローブをテストオブジェクトから Y 軸距離 2, 3, 4m で通過させシミュレーションを行う。その際の差動出力 $D1$ (図 2-3 における磁気センサ $S1$ と $S2$ の出力の差)及び $D3$ (図 2-3 における磁気センサ $S1$ と $S3$ の出力の差)を図 2-4(a)-(c)に示す。図 2-4 において、出力のマイナス値は X 軸のマイナス方向、出力のプラス値は X 軸のプラス方向とする。横軸を X 軸方向の距離、縦軸を磁束密度とする。図 2-2 に示すように、 X 軸方向 11m の位置にテストオブジェクトを配置している。差動出力 $D3$ に着目すると、図 2-4(a)では $D3$ が 11m の位置で出力がピークとなり、テストオブジェクトを検出できる。しかし、図 2-4(b)-(c)ではピークの位置が 11m と異なっており、出力による検出は困難である。従来法は、出力のピーク値があるしきい値を超えた場合にテストオブジェクトがあると判定するものであり、判定がシンプルで有効性が高い。しかし、図 2-4(b)-(c)のように Y 軸距離が大きくなる場合やテストオブジェクトが小さくなる場合に、 X 軸方向 11m 位置のピークが減少し検出が困難になる。また、鉄筋からの磁界が強い場合には X 軸方向 11m 位置のピーク以外の成分が増大し、テストオブジェクトの検出が困難になる。これら問題を解決するため、鉄筋からの磁界成分による出力を減少させ、テストオブジェクト成分の出力を強調する手法を研究する。



(a) Y 軸 距 離 2m



(b) Y 軸 距 離 3m



(c) Y 軸 距 離 4m

図 2-4 $D1$ 及び $D3$ の差動出力

2.4 提案する手法

ここでは、鉄筋とテストオブジェクトが複合する差動出力では検出が困難になる問題を解決するため、鉄筋成分を減らしテストオブジェクト成分を強調する解析手法の研究を行う。テストオブジェクト成分のみを強調するために、図 2-4 の差動出力から鉄筋成分とテストオブジェクト成分の分離を検討する。

図 2-5 は、図 2-4(b)と同一の位置関係において、鉄筋のみが存在する場合とテストオブジェクトのみが存在する場合の差動出力 $D3$ のシミュレーション結果である。図 2-5 では鉄筋の差動出力波形と比べ、テストオブジェクトの差動出力波形の傾きが急峻であることがわかる。ここでは傾きを比較するためテストオブジェクトの出力の極性を反転させて表示している。鉄筋はテストオブジェクトよりもプローブから離れた位置にあり、磁界分布が緩やかになる。これは線形双極子を持つ磁性体の磁界の強さがおよそ距離の二乗の逆比例になるためである⁽⁴⁾。鉄筋の場合は、約 $X=6.5\text{m}$ の地点で差動出力がマイナスのピークとなっており、 $X=14.5\text{m}$ の地点で差動出力がプラスのピークとなっており、 $X=6.5\text{m}$ から 14.5m の間では出力が直線的に変化している。テストオブジェクトの場合もマイナスのピークからプラスのピークまでの間の出力の変化がほぼ直線になっている。言い換えると、この間では X 軸方向の磁場勾配は一定といえる。

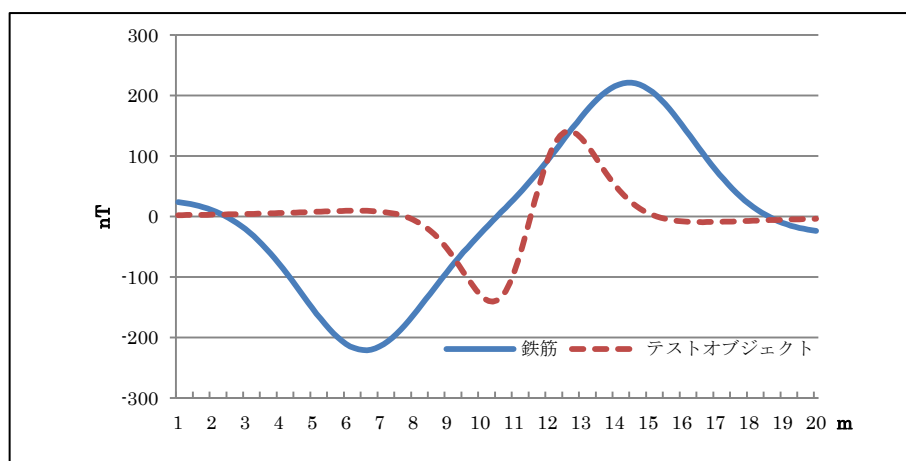


図 2-5 図 2-4(b)の個別 $D3$ 差動出力

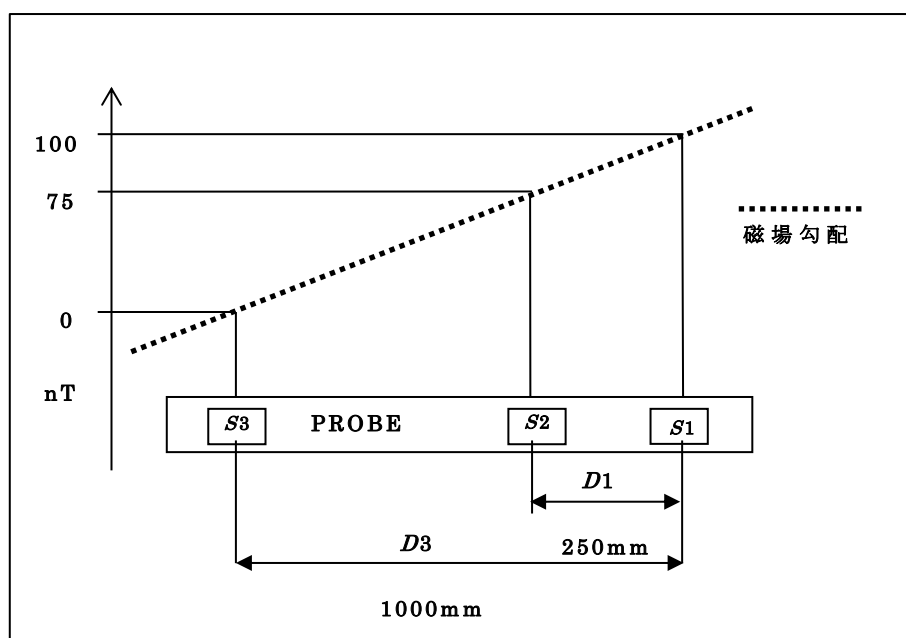


図 2-6 磁気の勾配と差動出力の関係

次に，図 2-3 のプローブが一定の磁場勾配下にある場合の差動出力 $D1$ ， $D3$ の関係を図 2-6 に表す。図 2-6 では $D1 = S1 - S2 (25\text{nT})$ ， $D3 = S1 - S3 (100\text{nT})$ であり，一定の磁場勾配下では $D1 : D3 = 25 : 100 = 1 : 4$ となる。つまり，一定の磁場勾配下では $D3$ は $D1$ の 4 倍の値を示す。

このことから，我々は鉄筋に起因する緩やかな変化を取り除くために，新たに DOD 関数(差動出力の差 : Difference of Difference)を定義する。式

(2.1)に DOD 関数を示す

$$DOD(x) = D3(x) - (4 \cdot D1(x)) \quad (2.1)$$

図 2-4(a)・(c)の差動出力をこの DOD 関数で演算することによって、鉄筋成分を減らした分布が生成される。(結果は<2.5.1>節で示す。)

次に、その分布からさらにテストオブジェクト成分のみを強調するためのフィルタリングを検討する。次の図 2-7 は図 2-4(a)から鉄筋成分を取り除き、テストオブジェクト単体の差動出力で得られた $D1$, $D3$ を、式(2.1)の DOD 関数で演算した結果である。図 2-7 に示す DOD 関数による演算結果は、画像処理分野でエッジ強調に使用される DOG 関数(Difference of Gaussian)と類似した分布となっている。そこで、今回のシミュレーションでは DOG 関数を用いてテストオブジェクト成分の強調を行うこととする。式(2.2)に DOG 関数を示す⁽⁵⁾。

$$DOG(x) = A\{G_1(x) - Q \cdot G_2(x)\} \quad (2.2)$$

$$DOG(x) = A\left\{\exp\left(-\frac{x^2}{\sigma_e^2}\right) - Q \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma_i^2}\right)\right\}$$

図 2-8 に DOG 関数の波形分布を示す。なお、この図では図 2-7 の出力波形に合うように A, Q, σ_e, σ_i の値を設定している。本章では、DOD 関数で演算された分布を、DOG 関数で畳み込み積分する(DOG フィルタリングと呼ぶ)。それによって、テストオブジェクト近傍の変化の大きい波形はより強調され、周囲の緩やかな部分は押さえられた分布が抽出されると見込まれる。その結果は<2.5.2>節に示す。

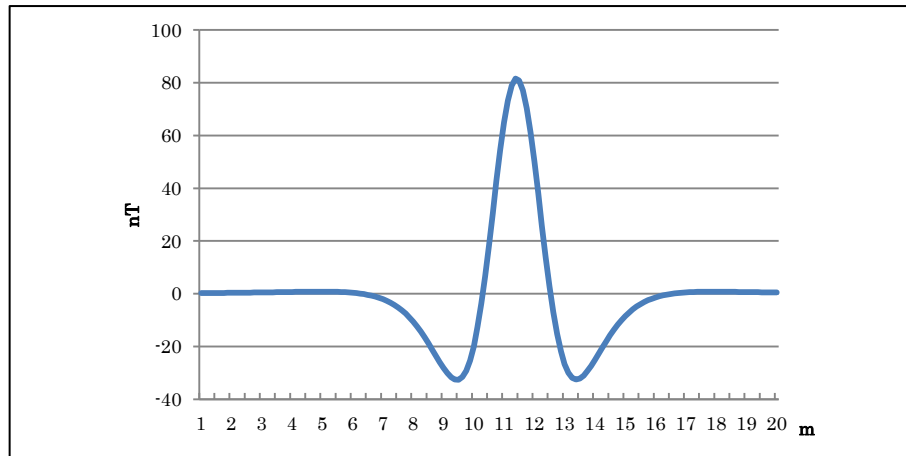


図 2-7 テストオブジェクト成分を DOD 関数で演算

(Y 軸距離 2m)

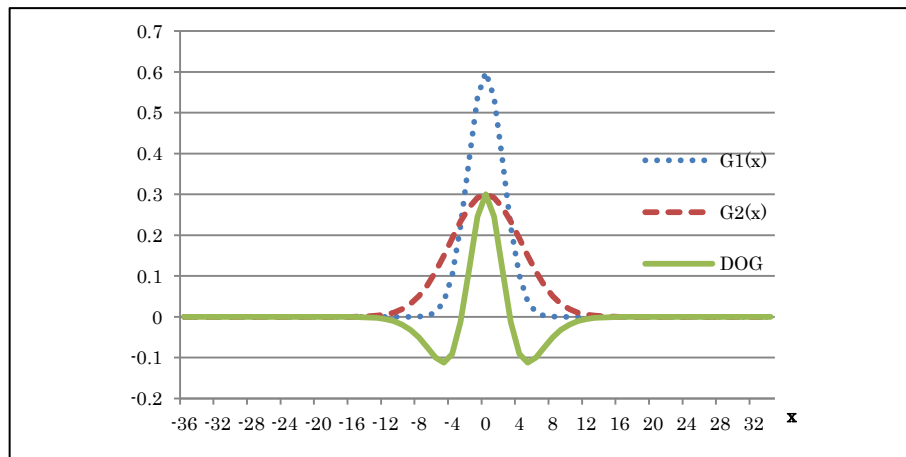


図 2-8 DOG 関数 ($A = 1.2, Q = 0.6, \sigma_e = 3, \sigma_i = 6$)

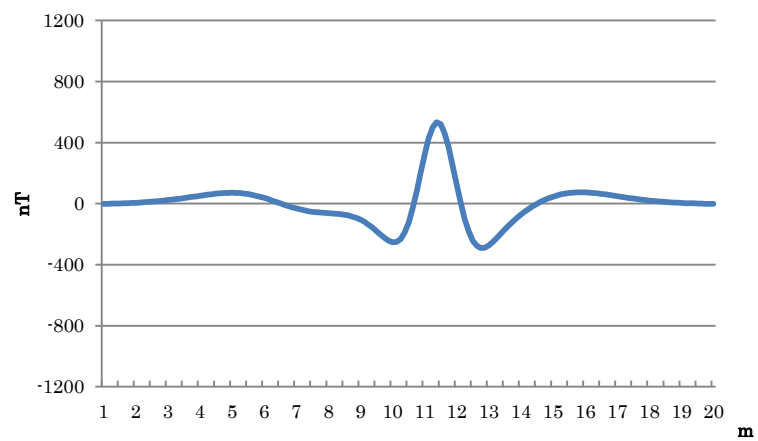
2.5 フィルタリングによる演算実験

2.5.1 DOD 関数フィルタリングによる結果と考察

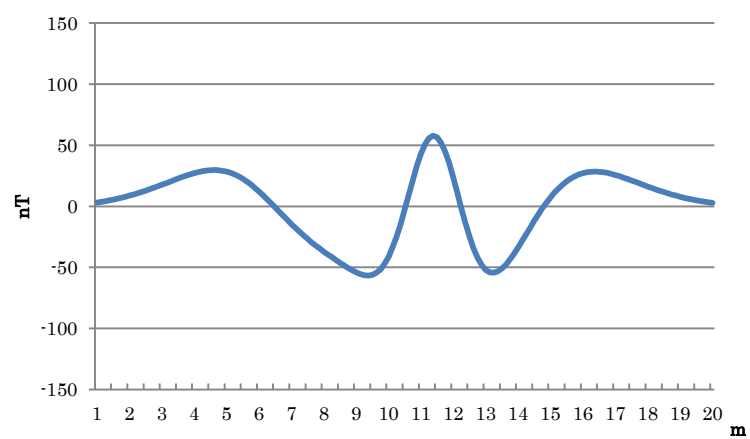
図 2-9(a)-(c)は図 2-4(a)-(c)を DOD 関数で演算した結果である。図 2-4 と図 2-9 を比較すると、図 2-4(a)の $D3$ 波形と図 2-9(a)の波形ともにテストオブジェクトのある位置 $X=11\text{m}$ で波形の出力がピークとなっている。しかし、図 2-4(b)の $D3$ の波形を見ると、 $X=15\text{m}$ の位置の出力が $X=11\text{m}$ の出力を上回っている。それに対し、図 2-9(b)では DOD 関数の効果によ

ってテストオブジェクトの位置 $X=11\text{m}$ のピークが上回っている。しかし、図 2-9(c) Y 軸距離 4m においては、テストオブジェクト成分のピークは、その周囲より小さくなった。これは、テストオブジェクトの Y 軸距離が $3, 4\text{m}$ と離れることで、テストオブジェクトの磁界も距離の二乗の逆比例で緩やかになるためと推測される。

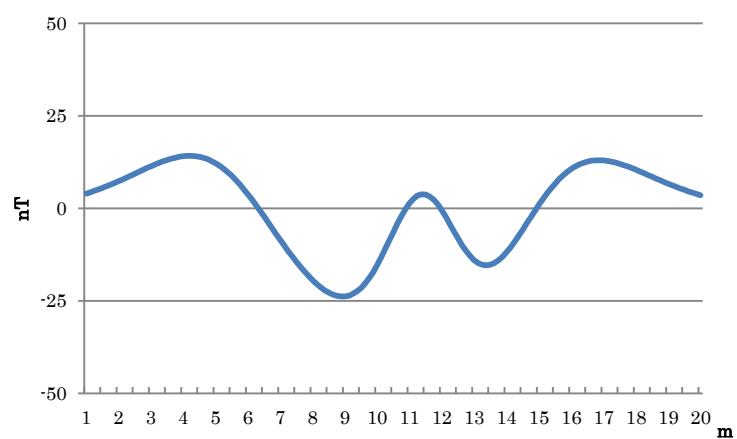
次にさらに過酷な条件として、図 2-2 において鉄筋の両端にそれぞれ -0.6 mWb と $+0.6\text{ mWb}$ の極を持たせ、鉄筋からの磁界が 2 倍になった場合の差動出力を DOD 関数で演算した結果を図 2-10 に示す。図 2-10(b)では図 2-9(b)と比べてテストオブジェクト成分 $X=11\text{m}$ のピークは鉄筋成分より小さくなり、検出が困難になった。以上の結果から、(1) テストオブジェクトとプローブの距離が離れる(Y 軸距離が大きくなる)場合と、(2) 鉄筋からの磁界が強くなる場合は、DOD 関数によって得られた波形からテストオブジェクトの位置を特定できていないことがわかる。



(a) Y 軸 距 離 2m



(b) Y 軸 距 離 3m



(c) Y 軸 距 離 4m

図 2-9 $D1$ 及び $D3$ 差動出力の DOD 関数演算結果

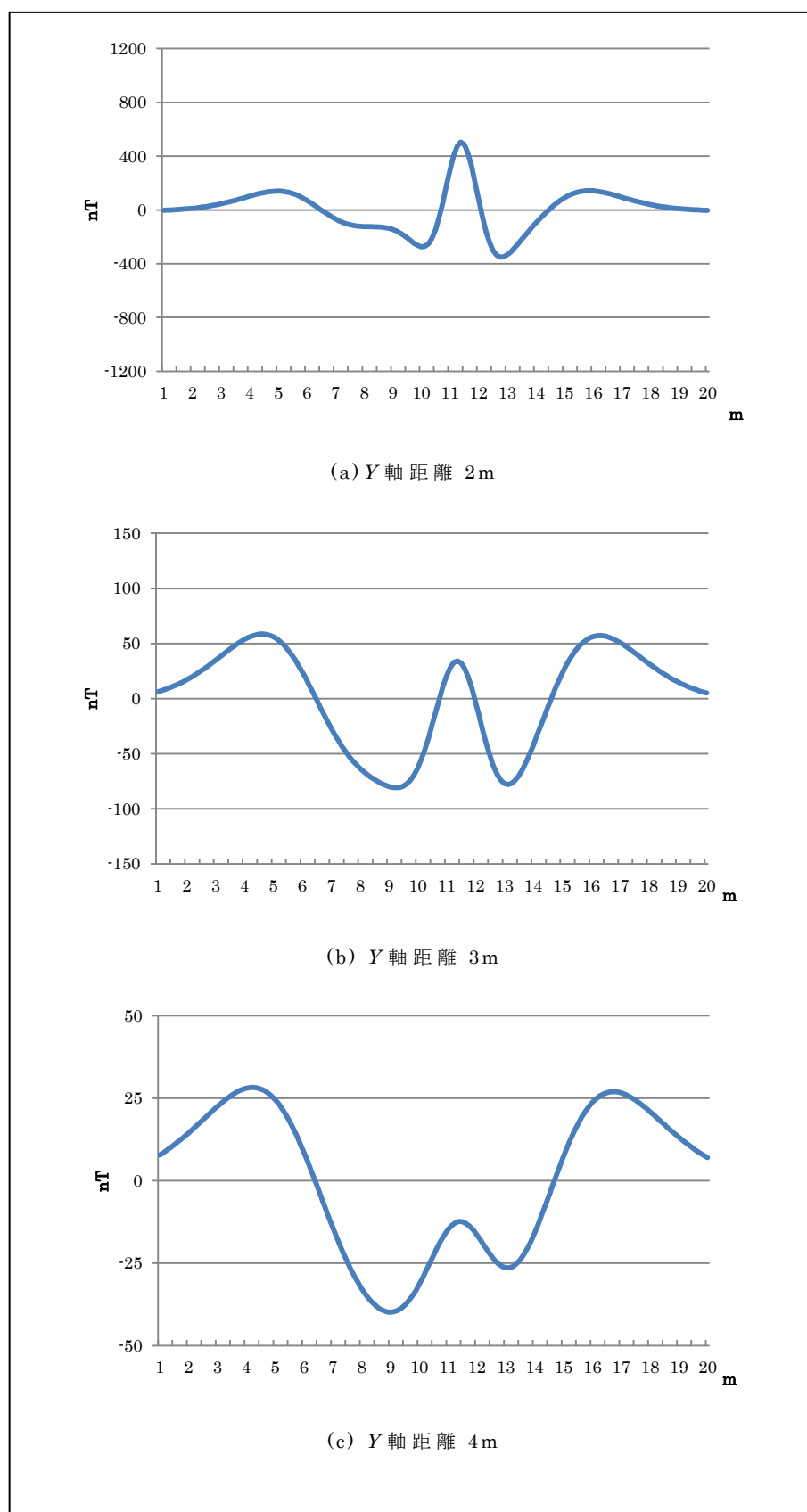


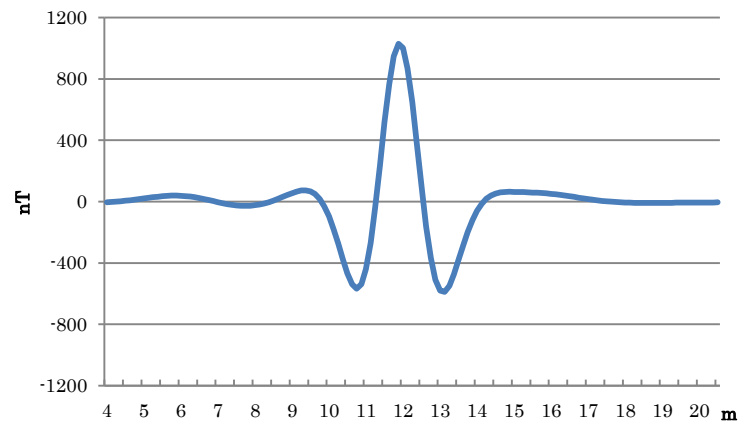
図 2-10 $D1$ 及び $D3$ 差動出力の DOD 関数演算結果

(鉄筋の磁界の強さ 2 倍)

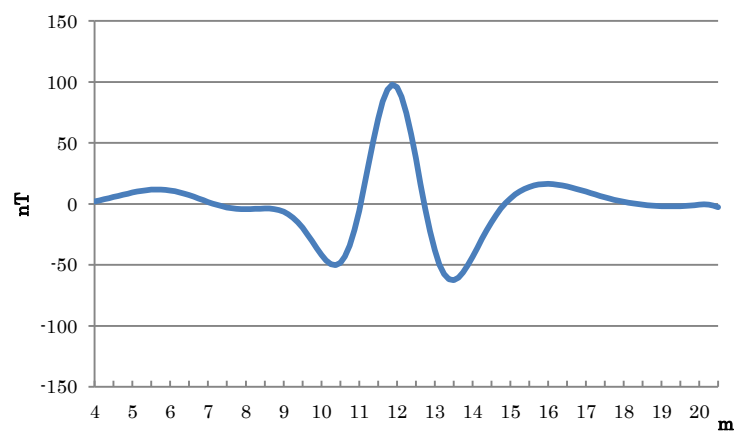
2.5.2 DOD 関数と DOG 関数フィルタリングによる結果と考察

次にテストオブジェクト成分を強調するため、DOG フィルタリングを行う。図 2-11(a)-(c)は図 2-8 の DOG 関数を用いて、図 2-9(a)-(c)の出力波形と畳み込み積分を行った結果である。図 2-9(a)-(c)と比べて図 2-11(a)-(c)では、テストオブジェクトのある $X=11\text{m}$ 近傍の出力が強調され、その周囲の成分は減少していることが確認できる。図 2-9(c)ではテストオブジェクトの位置の出力が周囲より小さくなっていたが、図 2-11(c)ではテストオブジェクト位置の出力が周囲を上回った。

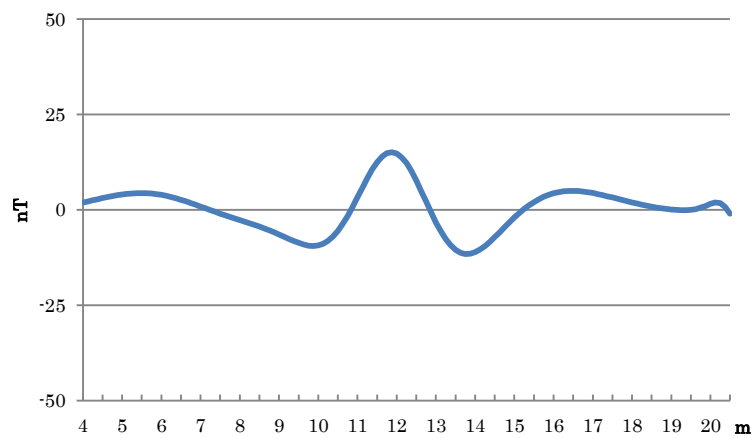
次に、鉄筋からの磁界が 2 倍になった場合の DOG フィルタリング効果を確認する。図 2-12(a)-(c)は図 2-8 の DOG 関数を用いて、図 2-10(a)-(c)の出力波形と畳み込み積分を行った結果である。図 2-10(b)-(c)ではテストオブジェクトのある $X=11\text{m}$ 近傍の出力が周囲成分より小さくなっていたが、図 2-12(b)-(c)では $X=11\text{m}$ 近傍の出力が周囲の成分を上回った。この結果、テストオブジェクトからプローブまでの距離が離れる場合(図 2-11)や、鉄筋からの磁界が強くなる場合(図 2-12)でも、DOG フィルタリングによって、テストオブジェクトのある位置の出力がその周囲出力を上回ることがわかった。



(a) Y 軸 距 離 2m

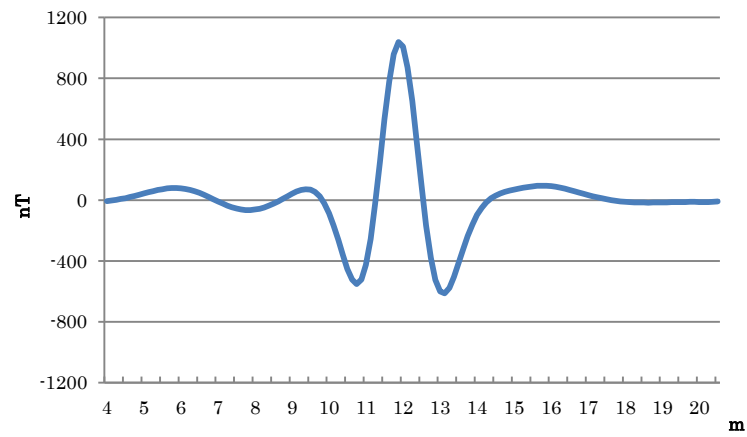


(b) Y 軸 距 離 3m

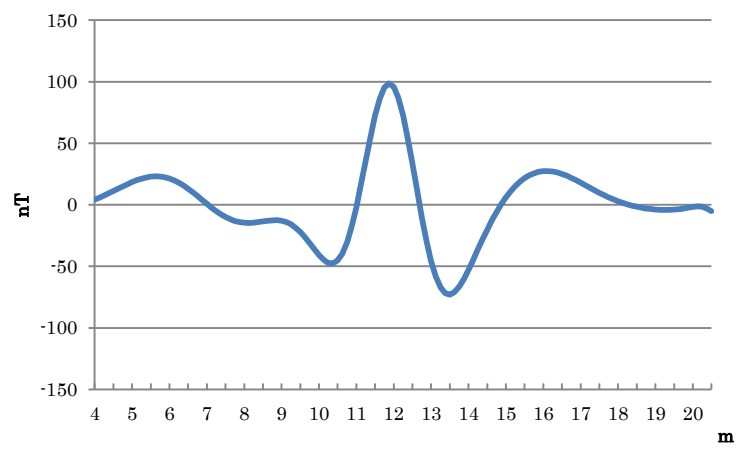


(c) Y 軸 距 離 4m

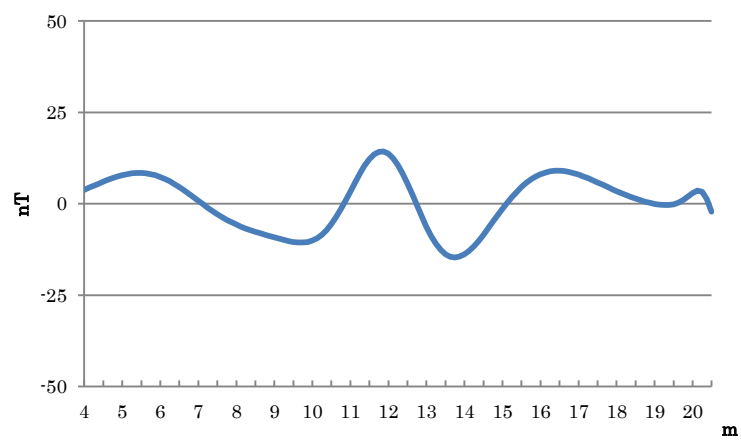
図 2-11 DOG フィルタリング結果



(a) Y 軸 距 離 2m



(b) Y 軸 距 離 3m



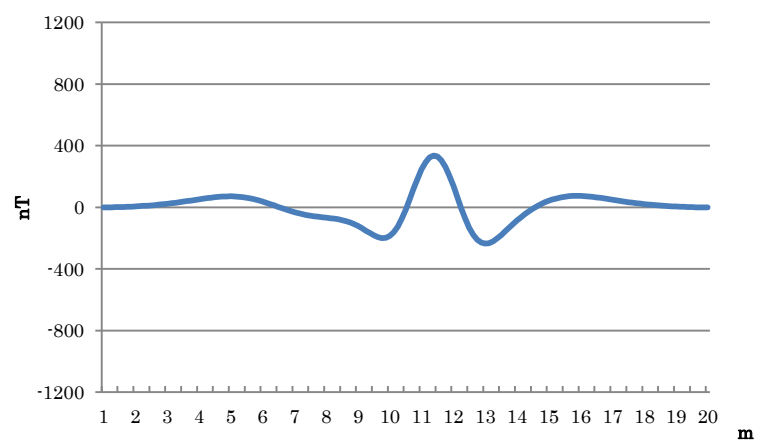
(c) Y 軸 距 離 4m

図 2-12 DOG フィルタリング 結果

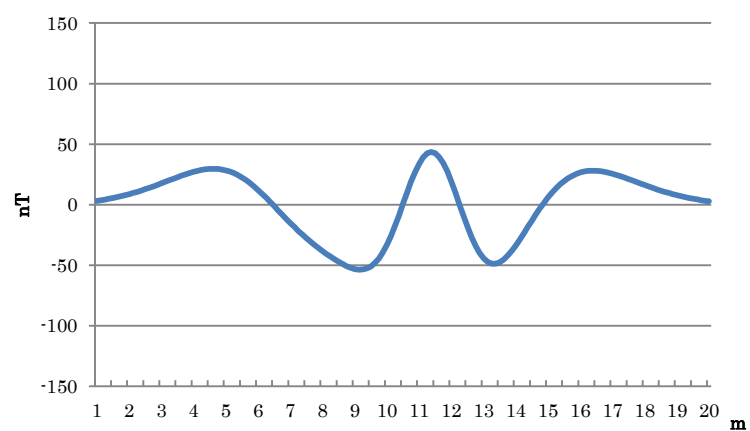
(鉄筋の磁界の強さ 2 倍)

次に図 2-2 において，テストオブジェクトの大きさを 1.5m に変更した場合の DOG フィルタリングの効果を確認する。この際 1.5m のテストオブジェクトには，Y 軸距離 2m において 0.4m のテストオブジェクトと同等の磁界分布となるように，両端に -0.055 mWb と +0.055 mWb の極を持たせた。図 2-13(a)-(c)はその際の差動出力を DOD 関数で演算した結果である。図 2-13(c)では，図 2-9(c)と同様にテストオブジェクト成分のピーク値が周囲より小さくなっている。

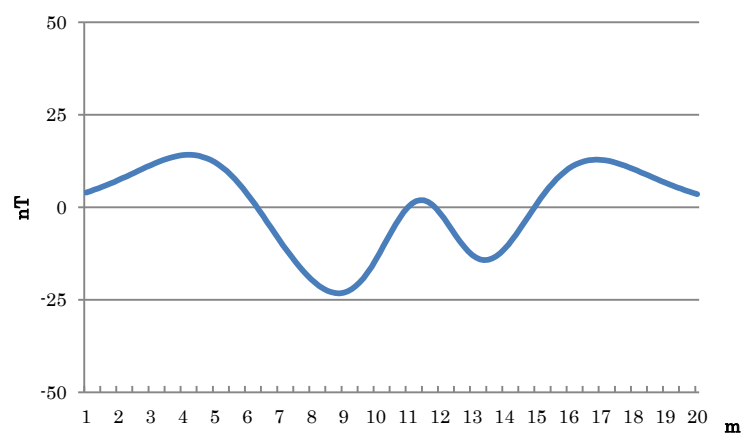
次に図 2-13(a)-(c)に図 2-8 の DOG 関数を用いてフィルタリングを行ったものが図 2-14(a)-(c)である。テストオブジェクトの大きさが変わってもテストオブジェクト成分のピークが周囲成分を上回った。しかし，テストオブジェクト成分のピーク値は，図 2-9(a)から図 2-11(a)で 1.92 倍となっている。これに対して，図 2-13(a)から図 2-14(a)では 1.66 倍と強調効果が低下した。これは，テストオブジェクトのサイズが 0.4m から 1.5m に大きくなったにも関わらず，DOG 関数の分布の広がりを変更していないためである。



(a) Y 軸 距 離 2m



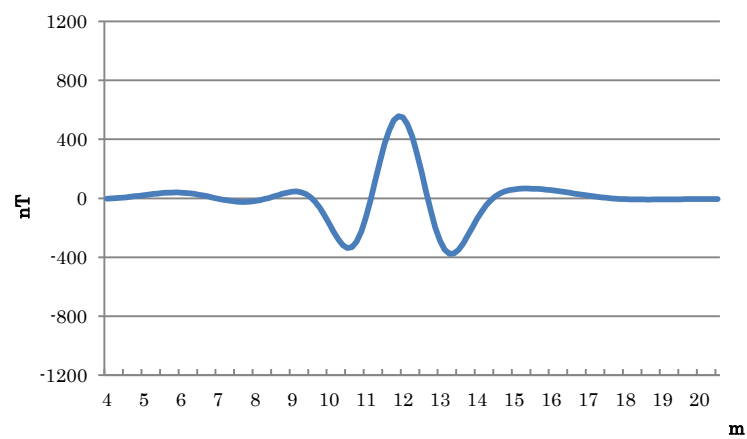
(b) Y 軸 距 離 3m



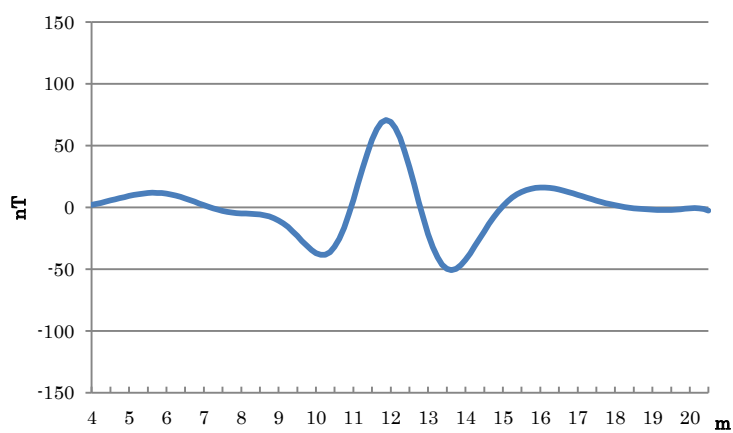
(c) Y 軸 距 離 4m

図 2-13 $D1$ 及び $D3$ 差動出力の DOD 関数演算結果

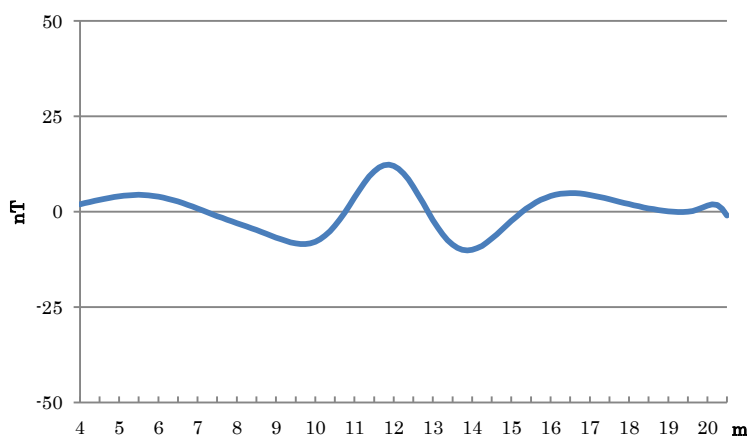
(テストオブジェクトの大きさ 1.5m)



(a) Y 軸 距 離 2m



(b) Y 軸 距 離 3m



(c) Y 軸 距 離 4m

図 2-14 DOG フィルタリング 結果
(テストオブジェクトの大きさ 1.5m)

そこで、図 2-15 に示すように、1.5m のテストオブジェクトの Y 軸距離 2m に合わせて、DOG 関数の広がりを変更した。図 2-16 は図 2-13(a)・(c) を図 2-15 の DOG 関数を使用して畳み込み積分を行った結果である。図 2-14(a)ではテストオブジェクト成分のピークが図 2-13(a)から 1.66 倍になったが、図 2-16(a)では 2.61 倍となった。図 2-14 と図 2-16 の結果から、テストオブジェクトの大きさ、位置、に合わせて DOG 関数を最適化することでフィルタリングの効果が変わることが確認できた。逆に言えば、最適なフィルタサイズを見つけることによって、テストオブジェクトのサイズを推定できる可能性がある。これについては今後さらに検討する必要がある。

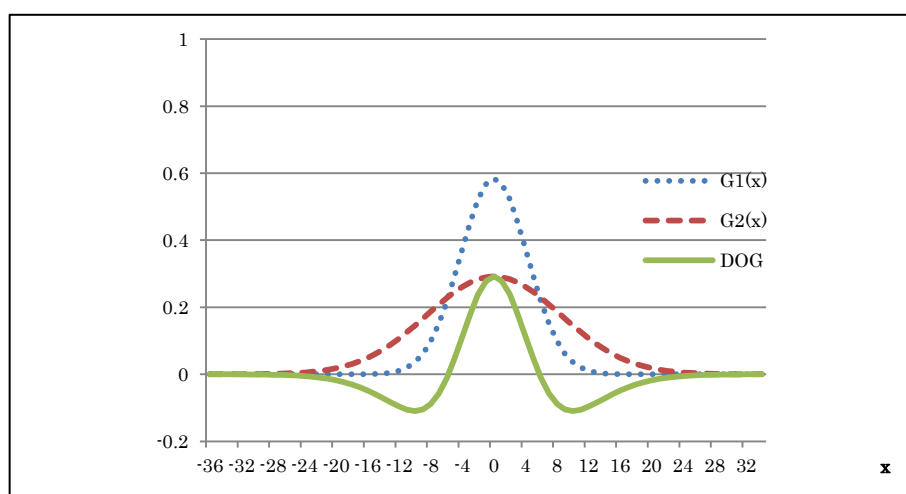


図 2-15 DOG 関数 ($A = 0.58, Q = 0.29, \sigma_e = 6, \sigma_i = 12$)

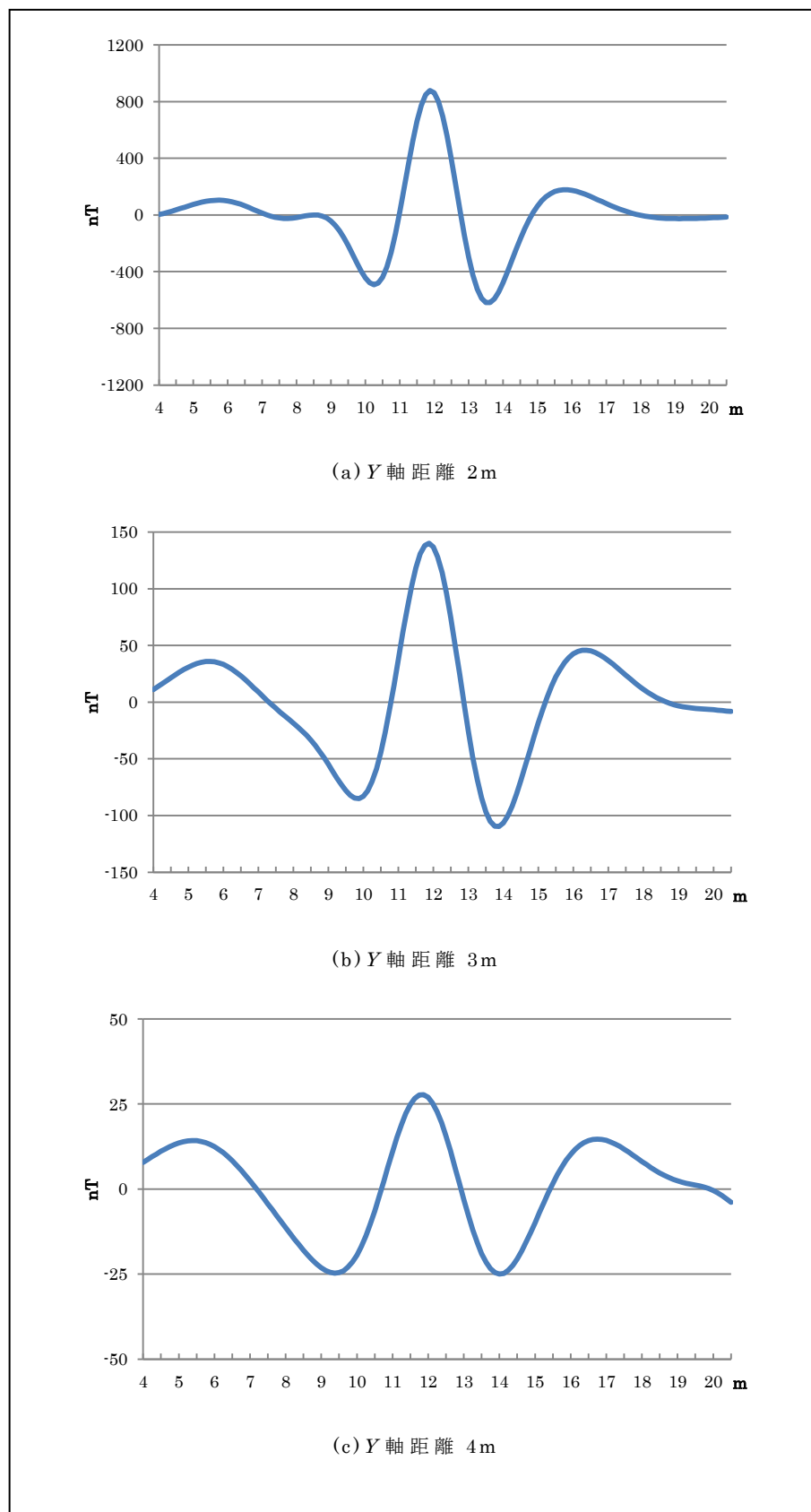


図 2-16 図 2-15 の DOG 関数による DOG フィルタリング結果

(テストオブジェクトの大きさ 1.5m)

2.6 不発弾検出性能の向上のまとめ

ここまで、異なる距離で構成された複数の差動出力を持つ磁気探査装置の探査能力の向上を提案した。本手法では磁気探査装置の差動出力 $D1$ 、 $D3$ に対し、DOD 関数による演算を行い、これによって得られた結果に、DOG 関数を用いてフィルタリングした。この手法を用いて、隣接エリアからの磁界の影響による誤検知エリア下において、従来は検出できなかった不発弾を検出できた。従来法では距離 2m でしか検出できなかった不発弾が、距離 4m で検出できた。これにより、本手法による磁気探査装置の探査能力の向上が確認できた。都市部での誤検知の頻度を軽減するために、本手法による解析が有効であるといえる。

2.7 不整地での探査作業

ここからは、磁気探査装置の運用における問題点を検討する。前述のとおり、磁気探査装置は測定者が磁気センサ部を携帯して歩行することで、探査を行っている。この計測作業手法に対し自動化を進めることで作業負荷の軽減を検討する。ここでは、ドローンなどに代表される空中を移動する装置に、磁気探査装置の磁気センサ部を搭載することを考える。この磁気センサ部は地磁気の中を携帯して移動する際に、地磁気の影響による測定値の変化を防ぐため、複数の磁気センサで構成されている。複数の磁気センサを同軸上に配置し、その出力の差分を取ることで地磁気環境下での移動に伴う測定値の変化の影響を取り除いている。なお、複数の磁気センサは最大 1~2m の棒状プローブの両端に配置される。そのうえで、このプローブの両端の磁気センサは同軸上にある必要がある。この棒状プローブが振動などでゆがむと、地磁気を打ち消せなくなり、大きなノイズが発生する。そのため、ゆがまない強度を持つ非磁性材で構

成される必要がある。積載量が限られた空中を移動するドローンなどにおいて、自重や振動でゆがまないほどの強度を持つ 1~2m の棒状の物体を搭載するのは、その大きさと重さが大きな問題になる。そこで、本研究では地磁気的环境下で地磁気の影響を取り除くための差動用磁気センサの必要ない、単一の磁気センサによる移動式の磁気計測システムを検討する。単一の磁気センサを搭載した移動装置を用いて、地磁気的环境下で移動した際に地磁気による計測値の変化を取り除くことができれば、磁気センサによる不発弾探査などの磁気分布計測が可能になる。このような装置を開発できれば、磁気探査装置の移動装置に棒状プローブを搭載する必要がなくなり、不整地などでの磁気計測に利用できる、移動式磁気計測システムの実用化が検討できる。また、この装置を利用して、不発弾だけでなく様々な測定対象物のもつ磁気分布の計測を、磁気センサを移動させて効率的に実施することが可能になる。

2.8 結言

本章では、地磁気環境下で不発弾探査に用いられる磁気探査装置を用いた磁気計測について研究を行った。磁気探査装置の磁気センサ部の誤検知問題の解決と、不整地での作業負荷の軽減について検討を行った。磁気センサを使った磁気探査装置による不発弾探査の問題として、都市部再開発時の誤検知の問題と、郊外の不整地での作業効率の問題がある。誤検知については不発弾探査のデータの分析を進め DOD 関数と DOG 関数を用いたフィルタリング等を行い、隣接エリアからの磁界の影響による誤検知エリア下において、従来検出できなかった不発弾を検出できた。次に不整地での不発弾探査の自動化について検討を行った。ここでは、単一の磁気センサを搭載した移動装置を用いて、地磁気的环境下で移動した際に地磁気による計測値の変化を取り除くことができれば、移動しながらの磁気分布計測が実現できると結論付けた。そこで、本研究では不発弾などの測定対象物の微弱な磁気分布を、単一の磁気センサを移動させて行う磁気計測で実現するために必要な技術について研究を行う。

参考文献

- [1] 沖縄県農林水産部,「磁気探査業務共通仕様書」, 共通仕様書, pp. 13-14, 2011
- [2] 義井胤影, 「磁気工学」, 海文堂, pp. 283-284, 1969
- [3] 川野 広志, 芹川 聖一, 「不発弾探査のための差動磁気センサ型磁気探査装置の改良」, 産業応用工学会論文誌, Vol. 1, No. 2, pp.47-51, 2013
- [4] Avrin, William F. and Sager, Ronald E., “An optically pumped magnetic sensor with submilligamma resolution”, IEEE Transactions on Magnetism, Vol. 25, No. 5, pp.3408-3410, 1989
- [5] 芹川聖一, 下村輝夫, 「網膜に類似した処理による光沢知覚シミュレーション」, 電気学会論文誌, Vol.C-113, No.11, pp.1023-1029, 1999

第3章 レーザによる測位を利用した移動式磁気計測手法 の検討と分析

3.1 緒言

測定対象物の微弱な磁気分布を求めるため、磁気センサを移動させる磁気計測手法を行う際に問題となるのが、地磁気である。地球上での磁気計測において、地磁気は確実に存在し無視できない存在である。三軸磁気センサを地磁気内に設置し静止させたとき、磁気センサは地磁気の X, Y, Z 軸成分を検知する。この三軸成分を合成したものが全磁力である⁽¹⁾。このとき、地磁気環境下で磁気センサを傾けると、全磁力は変化しないが、 X, Y, Z 軸の各成分は大きく値が変化する。そのため、不発弾探査では磁気センサを差動で使用して、この影響を除去している。しかし、本研究では単一の磁気センサを用いて地磁気の影響を除去できる移動式磁気計測システムの実現を目指す。このシステムであれば、不発弾などの測定対象物がもつ磁気分布を、単一の磁気センサを移動させながら得られるため、磁気探査装置の簡素化や動かすことが難しい大きな測定対象物の磁気計測が可能になる。本章では、移動式磁気計測システムの具体的検討を行う。

3.2 移動式磁気計測手法の検討

移動式磁気計測手法を検討するにあたり、まず図 3-1 に磁気センサを移動させない測定の手法を示す⁽²⁾。なお、この手法では移動装置や治具が鉄や鋼といった強磁性材料で構成される場合、磁気計測に誤差が生じる。そこで、これらは非磁性材料で設計される必要がる。そのため、対象物が人に運べない程度に大きく重くなると、移動装置の設計に際して強度やコストといった様々な問題が発生する。前述のように地磁気内で磁気センサの姿勢が変化すると、 X, Y, Z

軸の各出力は大きく変化する。ここで、磁気センサの姿勢とはZ軸の重力方向からの傾きと、X,Y軸の磁北⁽³⁾に対する角度で表される。通常の磁気分布計測では図3-1に示すように磁気センサを固定して、測定対象物を移動させて磁気計測を行っている。磁気センサが動かなければ、地磁気のX,Y,Z軸の各出力は変化しないため、計測値から地磁気分を差し引きすることで測定対象物の持つ磁気分布が得られる。上記から、磁気センサを移動させた際、移動前と移動後で磁気センサの姿勢が変化しなければ、磁気センサのX,Y,Z軸の各出力は変化しないことがわかる。つまり、磁気センサを固定した場合と同等の磁気計測が可能となる。しかし、操作者の感覚だけで姿勢を変化させず磁気センサを移動させることは通常は困難である。そこで本章では、磁気センサの姿勢情報を取得するシステムについて研究を行い、仮に姿勢に変化がある場合でも、姿勢情報から実測値に対し補正演算を行い、センサを固定している場合と同様の計測値を得る技術を研究する。そのために必要となる姿勢情報を取得するための光学装置について検討、実験を行い、目標とする磁気計測精度に必要な光学装置の性能を明らかにする。

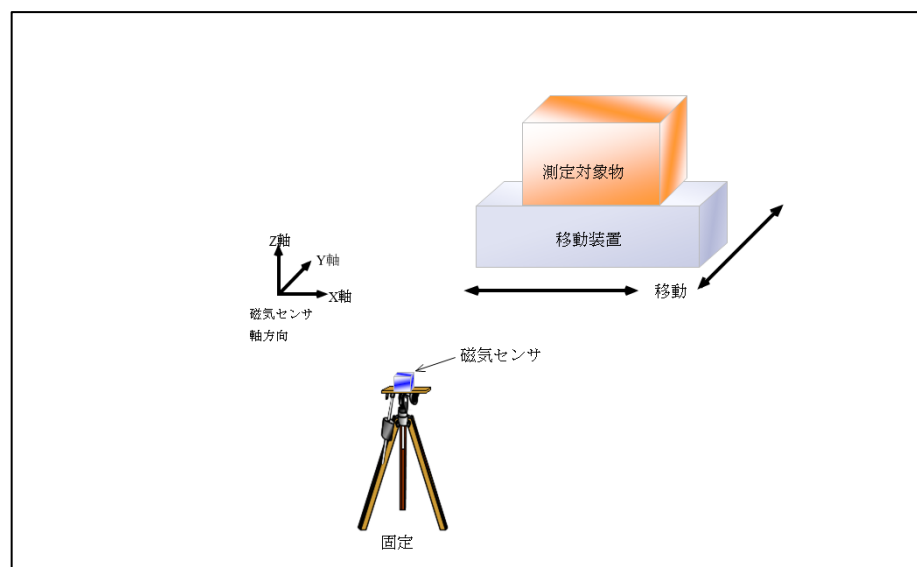


図 3-1 磁気センサを固定して行う磁気計測手法

3.3 目的とする移動式磁気計測の精度

ここでは目標とする磁気計測の精度を検討する。近年様々な測定対象物の磁気分布計測が求められているが、特に問題があるものが人の力で動かせないような大きな測定対象物の計測である。このようにサイズが大きい測定対象物の場合、移動させること自体が難しくなり、磁気センサを固定する既存手法での測定も困難な状況である。そのため、多くの企業はサイズが大きい測定対象物の場合、専用の設備のある専門業者に計測を依頼する等の対策が必要となっている。この大きなサイズの測定対象物の磁気測定の代表的な事例が、IATA（国際航空運送協会）の **Dangerous Goods Regulations** で定められる航空貨物の磁気測定である。航空貨物が航空機のコンパスに影響を及ぼす磁性体を判定するための、磁気測定の基準と許容値が定められている。ここでは、貨物から 2.1m の距離にて、磁束密度が 525nT 以下であることが定められている。そのために、磁性体を使用した内容物を含む航空貨物は、必ず磁気計測が必要となっている^(4・5)。多くの製造メーカーは航空機で輸送するような製品を開発する際、前述の問題等により、製品の磁気計測を専門業者に外注している。製品種類が少数、頻度が少ない製造メーカーの場合は問題ないが、種類や個数が多い場合は製造メーカーにとって磁気測定の外注費は大きな負担となっている。特に、製品のオプションルパーツが豊富な場合や、毎回特注仕様に対応するような装置の場合、頻繁に磁気測定を依頼しなければならない。

このような問題も移動式磁気計測システムを開発することで解決できる。提案する磁気計測システムでは磁気センサを移動させて磁気計測を行えるため、測定対象物の大きさや重さに関係なく、様々な対象物の磁気計測を行うことが可能となる。上記の 2.1m において 525nT 以下という航空

貨物の基準測定を実現するため、今回研究する手法では分解能 10 nT の移動式磁気計測システムの実現を目標とする。

3.4 提案する手法

目標とする 10 nT の分解能を持つ移動式磁気計測システムの実現のため、必要となるシステムについて検討を行い、さらに補正演算式について明らかにする。

提案する新しい磁気計測の手法は、移動する磁気センサの姿勢情報を取得し、その姿勢情報から実測した磁気計測データに補正を加える手法である。図 3-2 に、提案する移動式磁気計測手法の概略図を示す。

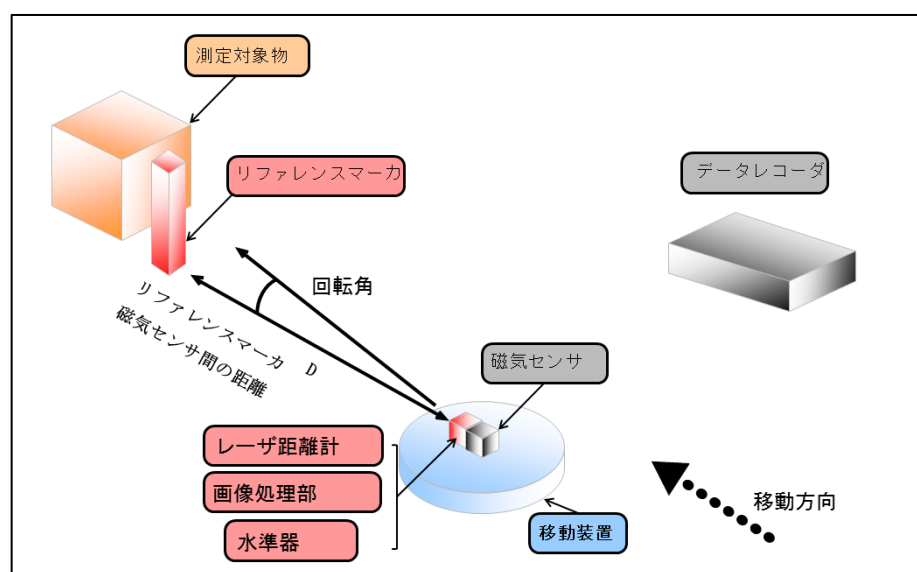


図 3-2 移動式磁気計測手法の概略図

提案する手法では、水準器センサ、レーザ、画像処理を組み合わせ、磁気センサの姿勢情報を取得する。磁気センサの姿勢情報は Z 軸の重力方向からの傾きと、X,Y 軸の磁北に対する角度で表される。この X,Y 軸の磁北に対する角度を回転角と呼ぶ。磁気センサの水平を水準器センサで保つことにより、Z 軸の姿勢は移動の前後で変化しない。これにより、磁気センサの Z

軸出力は移動の前後で同じ値となる。さらに、地磁気の磁北に磁気センサの X 軸方向を合わせる。これにより X 軸の磁束密度は E_m となり、Y 軸の出力は 0 になる。 E_m とは地磁気の X 軸成分と Y 軸成分の合成値であり、その磁束密度は日本国内ではおおよそ 30000nT 程度となる。この状態を X,Y 軸の磁北に対する回転角 0 度とし、その X,Y 軸の出力値を記録する。

この状態から磁気センサを移動させて磁気計測を行う。移動後に磁北から磁気センサが何度回転したか画像処理技術等を利用し正確に取得する。この姿勢情報を用いて移動後に計測した値を補正演算し、姿勢が変化していない場合と同等の値に補正する。この補正演算は以降の式で表される。ここではまず、測定対象物を設置しない条件で考える。事前に記録した移動前の地磁気の X 軸成分と Y 軸成分の合成値 E_m は次の式(3.1)となる。

$$E_m = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (3.1)$$

ここで、磁気センサの各軸出力と回転角との関係を図 3-3 に示す。移動式磁気計測システムは磁北から回転角±数度の範囲内での運用を想定しているが、わかりやすくするため図では±15 度の回転角の場合で表している。なお、磁気センサは X 軸方向を磁北方向に合わせているため、磁気センサの移動前の回転角は 0 度となり $E_x = E_m$, $E_y = 0$ となる。磁気センサの移動後に、磁気センサの回転角が θ_r ずれた場合に計測される X,Y 軸成分を E_{xd} , E_{yd} とし、その合成値 E_m' は式(3.2)となる。

$$E_m' = \sqrt{E_{xd}^2 + E_{yd}^2} \quad (3.2)$$

さらに E_{xd} , E_{yd} から現在の磁気の方角 θ_d を式(3.3)で求める。

$$\theta_d = \tan^{-1}\left(\frac{E_{yd}}{E_{xd}}\right) \quad (3.3)$$

これらを使い姿勢変化していない場合の E_x , E_y と等しくなるよう補正を行い、補正後の X,Y 軸成分 E_{xd}' , E_{yd}' を求める。これは次の式(3.4)(3.5)で表される。ここで θ_r に θ_d を加算することで、姿勢が変化していない場合の E_{xd}' , E_{yd}' の値を求めることができる。なお、移動式磁気計測システムでは磁北からの回転角を±数度以内でかつ、地磁気以下での磁気計測を想定しているため、 E_x の値はマイナスを取らないとして考える。

$$E_{xd}' = E_m' \times \cos(\theta_r + \theta_d) \quad (3.4)$$

$$E_{yd}' = E_m' \times \sin(\theta_r + \theta_d) \quad (3.5)$$

ここで、任意の磁束密度を持つ測定対象物がある場合、任意の磁束密度の X,Y 軸成分 E_{xt} , E_{yt} は次の式(3.6)(3.7) になる。

$$E_{xt} = E_{xd}' - E_m \quad (3.6)$$

$$E_{yt} = E_{yd}' - E_m \quad (3.7)$$

このように、姿勢情報による補正を加えることで磁気センサの姿勢がずれた場合にも、測定場所における X,Y,Z 各軸の磁気成分を正確に計測することが可能となる。

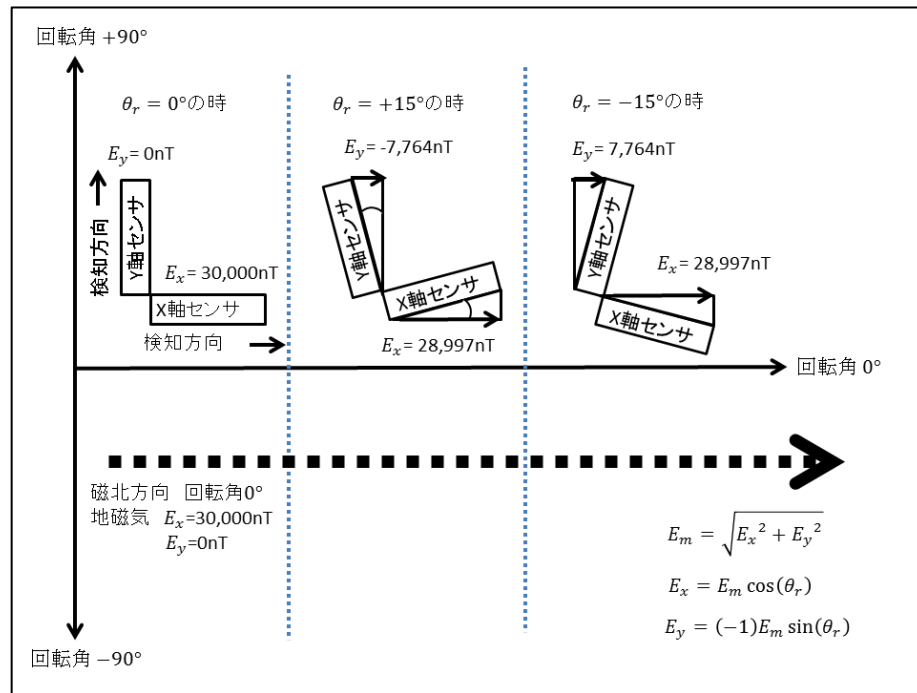


図 3-3 X,Y 軸の磁気センサと回転角との関係

3.5 目測による回転角の取得実験

ここでは本章で行う実験について説明する。まず、本研究では磁気センサの姿勢情報を取得し、これを用いて移動式の磁気計測システムを構築することを目的としている。磁気センサの姿勢とは Z 軸の重力方向からの傾きと、X,Y 軸の磁北に対する回転角で表される。水平を水準器センサで保つことにより、磁気センサの Z 軸出力は移動の前後で同じ値に保つ。X,Y 軸の回転角は基準ライト、カメラ映像による画像処理等の技術を使用して求めることを想定している⁽⁶⁾。

これらを踏まえ、本章ではこの回転角を求める手法について研究を行う。回転角の精度と磁気計測の精度の関係性について研究することで、画像処理等で得られる姿勢情報に要求される精度と機能を明らかにすることができる。これにより、高精度の移動式の磁気計測システムを実現するために必要となる姿勢情報を入手するための機能と精度を明らかにすることができる。そしてこの実験で検討、確認した回転角度の精度から、最終的に磁

気センサ移動方式の磁気計測において実現できる精度を求める。

実際の実験は、図 3-4 で示される構成で行うこととする。磁気センサとレーザ距離計を同一のターンテーブルに設置し、テーブルを回転させて、ターゲットボードに対して磁気センサに任意の回転角を与える。この回転角は、図 3-5 で示すようにターゲットボードのスケールに照射されたレーザ光を目視で判断し求める。図 3-4 に示すようにターゲットボードと磁気センサ間の距離を D 、レーザ光がスケール上を移動した距離を D_r とし目測で読み取る。これにより、任意の回転角 θ_r は次の式(3.8)で求める。

$$\theta_r = \tan^{-1}\left(\frac{D_r}{D}\right) \quad (3.8)$$

この時の回転角 θ_r をターゲットボードと磁気センサ間の距離 D を変えながら与える。この回転角をもとに、計測した地磁気の磁気データを補正演算する。この目視で求めた回転角での補正データと、理論値から求めた補正データを比較し、目視での補正による精度を求める。この目視部分を画像処理の性能に置き換えることで、実際に必要となる画像処理による回転角認識の性能を明らかにできる。なお、今回は地磁気データに補正を加えて、補正の誤差を判断することとし、ターゲット側に変動磁気は持たせていない。また、磁気センサの垂直水平はターンテーブル上の水準器を使用して確保する。回転角度の 0 度判定はターンテーブル上に平行に配置した二つのレーザ距離計が出力するターゲットボードとの距離を一致させることで確保し、それを磁北に合わせて X 軸方向とする。今回の実験環境は、地磁気が一様に分布し、なおかつ車両や架線電流などによる変動磁気が少ない場所で実施する⁽⁷⁾。次の図 3-6 に実際に実験で使用した器具類等の写真を示す。

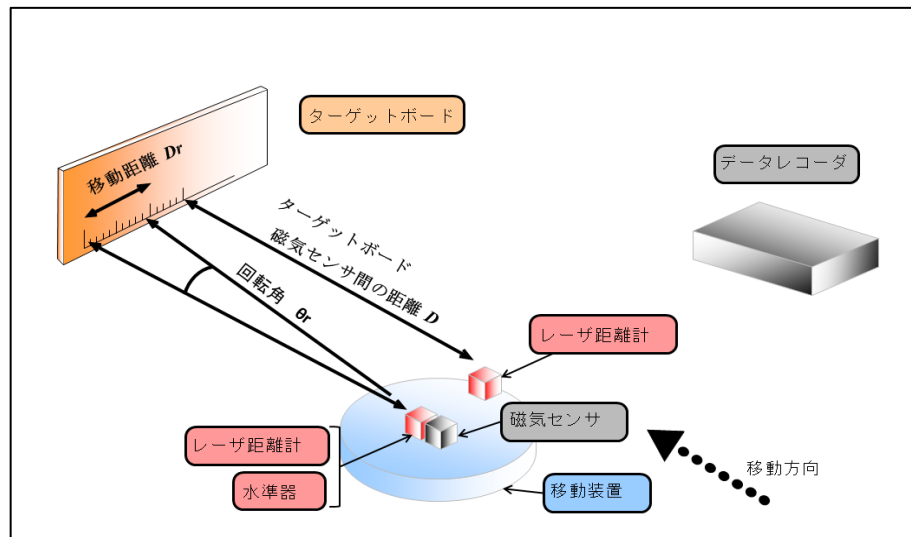


図 3-4 実験に用いた移動式磁気計測手法の概略図



図 3-5 ターゲットボードのスケールに照射されたレーザ光

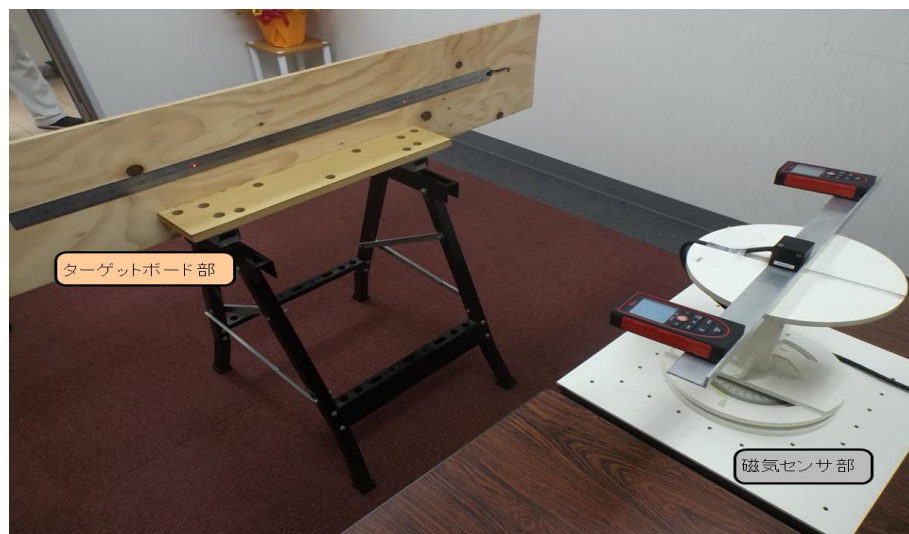


図 3-6 実験器具

3.6 目測による回転角の取得実験結果と考察

ここでは、実測し取得した目視による回転角毎の磁気計測データと、理論値で与えられる磁気データとを比較し、補正演算及び磁気計測の精度誤差を求める。図 3-4 及び図 3-6 で示した機器構成において、実際に磁気センサを移動させて磁気計測を行い、実測した回転角補正前の磁気計測データを以下の表 3-1 に示す。表 3-1 の磁気計測では、磁気センサの X 軸を磁北の方向に合わせている。そのため、回転角 0 度における地磁気の磁束密度の X,Y 軸成分は $E_{xd} = 33080nT$, $E_{yd} = 0nT$ である。また、磁気センサの水平を水準器センサで保つことにより、移動の有無にかかわらず Z 軸の磁気計測データは変化していない。磁気センサには分解能 10nT のエムティアイ社製 FM-385 を使用している。レーザ距離計はライカ社製の RA100 を使用し、磁気センサ、レーザ距離計は樹脂製のターンテーブル上にアルミフレームを介して設置している。表 3-1 の実測による磁気計測データに対して理論値による磁気計測データを表 3-2 に示す。各回転角度における、表 3-1 と表 3-2 の磁気データの差が本実験の目測による磁気計測データ補正の精度である。表 3-3 は式(3.2)・(3.5)を使用して、表 3-1 の実測した磁気データを補正演算した結果である。表 3-3 から実測した磁気計測データがターゲットボードと磁気センサ間の距離を D が 2000mm において 13nT の範囲で補正できることが分かる。これが、目測による回転角認識による移動式磁気計測の精度となる。なお、距離 D が 5000mm 以上のデータにおいては、ターゲットボードのスケールの読み値が本実験の最小値 0.01 度でも 1mm 程度確保されるため、目測誤差はほぼ発生していない。そのため、補正後の誤差はそのほとんどが磁気センサの性能に依存している。

表 3-1 各回転角で実測した磁気計測データ

磁気センサ		目測によって設定した各回転角の磁気計測データ				
距離	軸	0.01°	0.05°	0.1°	0.5°	1.0°
2000mm	X	33080nT	33080nT	33080nT	33080nT	33070nT
	Y	10nT	30nT	60nT	290nT	590nT
5000mm	X	33080nT	33080nT	33080nT	33080nT	33070nT
	Y	0nT	20nT	50nT	280nT	580nT
10000mm	X	33080nT	33070nT	33070nT	33080nT	33070nT
	Y	0nT	20nT	50nT	280nT	570nT
20000mm	X	33080nT	33080nT	33080nT	33080nT	33080nT
	Y	0nT	30nT	60nT	290nT	580nT

表 3-2 各回転角の磁気計測データの理論値

磁気センサ		各回転角の磁気計測データの理論値				
距離	軸	0.01°	0.05°	0.1°	0.5°	1.0°
各距離	X	33080nT	33080n	33080nT	33079nT	33075nT
	Y	6nT	29nT	58nT	289nT	577nT

表 3-3 各回転角の補正後の磁気計測データ

磁気センサ		各回転角の補正後の磁気データ				
距離	軸	0.01°	0.05°	0.1°	0.5°	1.0°
2000mm	X	33080nT	33080nT	33080nT	33081nT	33075nT
	Y	4nT	1nT	2nT	1nT	13nT
5000mm	X	33080nT	33080nT	33080nT	33081nT	33075nT
	Y	-6nT	-9nT	-8nT	-9nT	3nT
10000mm	X	33080nT	33070nT	33070nT	33081nT	33075nT
	Y	-6nT	-9nT	-8nT	-9nT	-7nT
20000mm	X	33080nT	33080nT	33080nT	33081nT	33085nT
	Y	-6nT	1nT	2nT	1nT	3nT

表 3-4 地磁気環境下での D_r の誤差による磁気計測の精度

磁気センサ		目測による D_r の誤差毎の磁気計測精度			
距離	軸	$\pm 0.3\text{mm}$	$\pm 0.8\text{mm}$	$\pm 1.0\text{mm}$	$\pm 1.2\text{mm}$
2000mm	Y	$\pm 4.9\text{nT}$	$\pm 13.2\text{nT}$	$\pm 16.5\text{nT}$	$\pm 19.8\text{nT}$

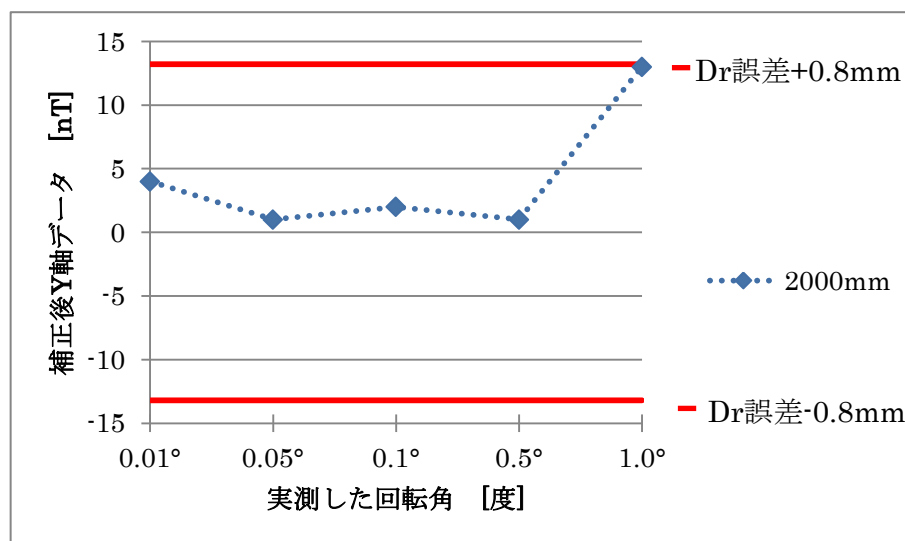


図 3-7 D_r 誤差 $\pm 0.8\text{mm}$ 時の補正後 Y 軸データの誤差範囲と距離

2000mm 時の補正後 Y 軸磁気データの関係

次に、これらの結果から D_r に対する目測による読み取り誤差を分析する。

この性能を明らかにすることで、本論文の目的である移動式磁気計測システムが姿勢情報取得システムに要求する精度を明らかにできる。表 3-4 に D_r の誤差毎の磁気計測の精度を示す。これは式(3.8)の D_r に任意の誤差範囲を与えて表 3-1 の磁気計測データを補正した場合の磁気計測の誤差範囲の結果である。目測による姿勢情報の入手手法において、式(3.8)からもわかる通り距離 D が小さいほど D_r の誤差による磁気計測への影響は大きくなる。そのため、表 3-4 では D が最小となる 2000mm の場合のデータで評価を行っている。図 3-7 に D_r の誤差と磁気計測データの精度のグラフを示す。

今回の実験では磁気計測の精度が距離 2000mm の際に $\pm 13\text{nT}$ 程度であったことから、本章の目測による D_r の読み取り誤差は $\pm 0.8\text{mm}$ であるとわかる。さらに表 3-4 の D_r の読み取り誤差が $\pm 0.3\text{mm}$ の際、磁気計測精度が $\pm 4.9\text{nT}$ となる。この精度は測定対象物が存在しない条件であり、地磁気のみに対する精度となる。本研究では地磁気以下の磁気計測を目的としているため、測定対象物の持つ磁気は地磁気以下を想定している。そのため、ここでの磁気計測の計測範囲は最大で地磁気の 2 倍となる。地磁気の 2 倍の磁気が存在する環境では、磁気計測の精度は $\pm 4.9\text{nT} \times 2$ となり約 $\pm 10\text{nT}$ の精度となる。つまり $\pm 0.3\text{mm}$ 程度の読み取り性能を持つ光学装置であれば、地磁気以下の磁気を持つ測定対象物に対して、磁気計測精度 $\pm 10\text{nT}$ を持つ移動式磁気計測が実現できることが分かる。

3.7 結言

本章では、地磁気的环境下において磁気センサを移動させて行う磁気計測システムを 10nT 以下の分解能で実現するために必要な機能の検討と評価を行った。姿勢情報を取得し、磁気計測データを補正する移動式磁気計測システムの検討を行い、その手法を提案した。次に、姿勢情報を取得する装置に要求される性能を明らかにする実験を行った。今回の試作機の目測による姿勢情報の取得では、 $\pm 0.8\text{mm}$ の読み取り性能であることが分かった。この結果から、距離 2000mm において $\pm 0.3\text{mm}$ 以下の測位能力を持つ光学装置であれば、分解能 10nT での磁気計測が可能との知見を得た。

参考文献

- [1] 高梨弘毅,「磁気工学入門－磁気の初歩と単位の理解のために」, 共立出版, pp.12-14, 2008
- [2] 日本建築学会, 「環境磁場の計測技術－現場における計測の事例－」丸善, pp.130-142, 1998
- [3] 毛利佳年雄, 「磁気センサ理工学」, コロナ社, pp.4-5, 1998
- [4] International Air Transport Association, "Dangerous Goods Regulations 54th Edition." International Air Transport Association, pp. 538, 2013
- [5] 国土交通省, 「航空法施行規則」, 第百九十四条 航空機による爆発物等の輸送基準等を定める告示, 2015
- [6] 画像電子学会, 「画像電子情報ハンドブック」, 東京電機大学出版局, pp.667, 2008
- [7] 日本建築学会, 「電磁環境と建築設計－初めての設計者のために－」, 丸善, pp.3-10, 2000

第 4 章 姿勢情報取得システムの開発と移動式磁気計測システムの評価

4.1 緒言

本章では第 3 章で明らかにした姿勢情報に必要な精度をもとに、新たに姿勢情報取得システムを検討、開発する。実際に試作機を製作し姿勢情報取得システムの性能を評価、確認する。さらにその姿勢情報取得システムを用いて実現できる移動式の磁気計測システムの性能を確認する。

本論文では分解能 10 nT で計測が可能な磁気計測システムの実現を目標としている。その理由については前述のとおり移動式磁気計測がとても有効で需要もあると考えられる IATA（国際航空運送協会）の **Dangerous Goods Regulations** で定められる航空貨物の磁気測定を基にしている。ここでは、貨物から 2.1 m の距離にて、磁束密度が 525 nT 以下であることの確認が定められている。この航空貨物の磁気計測を、提案する移動式磁気計測システムで実現することを第一目標にして、本章を進める。

4.2 姿勢情報取得システムの検討

ここでは、磁気センサの姿勢情報を取得するために適したセンサや手法の検討を行う。この結果に基づき試作機を製作し性能評価を行う。

第 2 章で述べた通り、磁気センサを移動させた際に姿勢に変化がなければ、磁気センサを固定する手法と同様の磁気計測が可能となる。そのためには、磁気センサの姿勢を正しく測る必要がある。姿勢情報を取得するセンサには様々な種類があるが、本研究では磁気計測を目的としているため、姿勢情報を得る手法として磁気センサによる情報を使用することはできない。磁気センサは市販されている一般的な姿勢測位センサである 6 軸、9

軸センサに採用されるなど、有力な姿勢情報入手用センサである⁽¹⁾。しかし、その仕組みは磁気センサによる電子コンパス⁽²⁾であり、測定対象物の持つ磁気が姿勢情報を取得するための磁気センサにも影響し、磁気計測においては正しい姿勢情報を得ることができない。そのため、今回の手法では、姿勢情報を、磁気センサを用いずに取得する。近年、半導体レーザや、レーザ距離計、CCDカメラなど、光学装置を構成するのに必要となる各種機器において、大変安価で高性能な素子やセンサが登場している⁽³⁾。これらの利用を考え、本章では光学装置での姿勢情報の取得を検討する。この光学装置を使用して磁気センサ移動後の姿勢情報を得ることで、磁気センサを移動させて磁気計測を行う移動式磁気計測システムの実現を目指す。

4.3 提案する姿勢情報取得システムの手法

本章では、光学装置を使って磁気センサの姿勢情報を取得する。第2章でも示したように、光学装置は主にレーザと画像処理用のカメラ、の組み合わせで構成される。ここで、図4-1にセンサを固定する磁気計測手法と、磁気センサを移動する磁気計測手法の概略図を示す。図4-1(b)に示すように磁気センサ側に姿勢情報取得機能を持たせ、測定対象物側には測位の基準となるリファレンスマーカーを配置する。磁気計測時の磁気センサの移動は、図4-1(b)-1の場合は対象物に向かって計測する。図4-1(b)-2の場合は測定対象物と平行に移動し計測する。いずれの場合も、図4-1(a)のように測定対象物を動かす代わりに磁気センサをリファレンスマーカーに向かって移動させる。

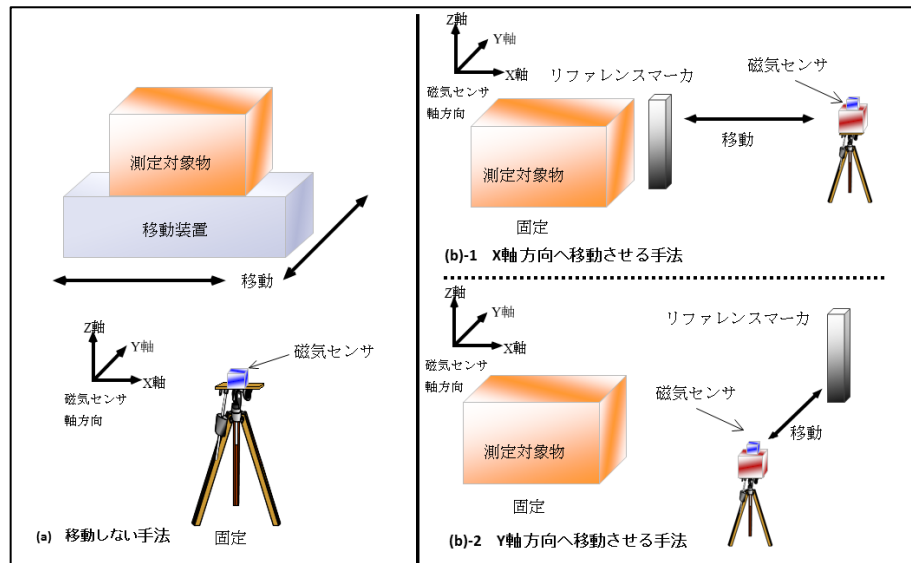


図 4-1 センサを固定する磁気計測手法と、磁気センサを移動する磁気計測手法の概略図

次に、具体的にリファレンスマーカと光学装置について考える。姿勢変化を取得する光学装置の詳細を図 4-2 に示す。(a)磁気センサを移動させた際、磁気センサの水平を(b)水準器センサで保つことにより、Z 軸成分は移動の前後で同じ値にできる。ここで、水準器センサにはタジマ社製レーザ墨出し器 ZERO-KJY、照射ライン精度 0.81mm/10m を使用する。リファレンスマーカに設置した水準器用ラインに水準器のラインを合わせることで、磁気センサを水平に保つ。リファレンスマーカから磁気センサ間の距離 2m において 10 回の水平調整を実施しその結果を表 4-1 に示す。この表から磁気センサの Y 軸成分の磁束密度が 1nT 以下の誤差範囲内であることが確認される。照射ライン精度を超える結果となったが、ここでは照射レーザラインの中心部しか使用しないため、歪みが少なく誤差が小さいと推定される⁽⁴⁾。(c)リファレンスマーカは、2 つの(d)ゼロ点基準レーザと、

(e)回転角レーザ用の反射鏡を持っている。なお磁気計測時の磁気センサの移動は、図 4-1(b)-1 の場合は対象物に向かって計測する。図 4-1(b)-2 の場合は測定対象物と平行に移動し計測する。いずれの場合も、磁気センサはリファレンスマーカーに向かって移動させる。この際の XY 平面における角度のずれを(f)回転角レーザ、(d)ゼロ点基準レーザ、(g)画像入力用カメラで入手した映像による画像処理を使用し、回転角データとして取得する。画像処理部ではレーザ光を捉えるフィルタとしてカメラ前に外部光を遮蔽するボックスを用意し、その前面にペーパーフィルタを装備する。これにより、ゼロ点基準レーザと回転角レーザを強調してカメラで捉えることができる⁽⁵⁾。

第 3 章では磁気センサを移動させた際の角度のずれを回転角として取得し補正した。しかし、実用性を考慮した試作機を考えると、回転角のずれだけでなく図 4-3 に示すようにリファレンスマーカーと磁気センサを結ぶ直線上からそれる座標のずれに対する対策が必要である。そこで、本章の試作機では座標ずれに対する対策としてリファレンスマーカー側からもレーザ光を照射し、磁気センサの座標情報を姿勢情報として取得する。

表 4-1 水平調整作業に伴う磁気センサの Y 軸出力

(X,Z 軸出力は変化なし X:33083.0nT,Z:36041.0nT)

調整作業	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
Y 軸出力	0.0nT	0.0nT	0.5nT	0.0nT	0.0nT
施行回数	6 回目	7 回目	8 回目	9 回目	10 回目
Y 軸出力	-0.5nT	0.0nT	0.0nT	0.0nT	0.5nT

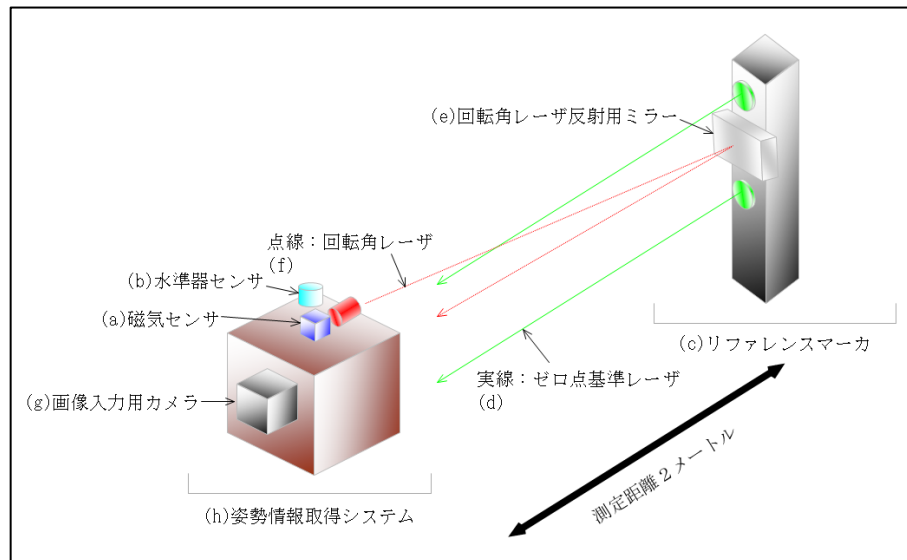


図 4-2 姿勢情報取得装置の概略図

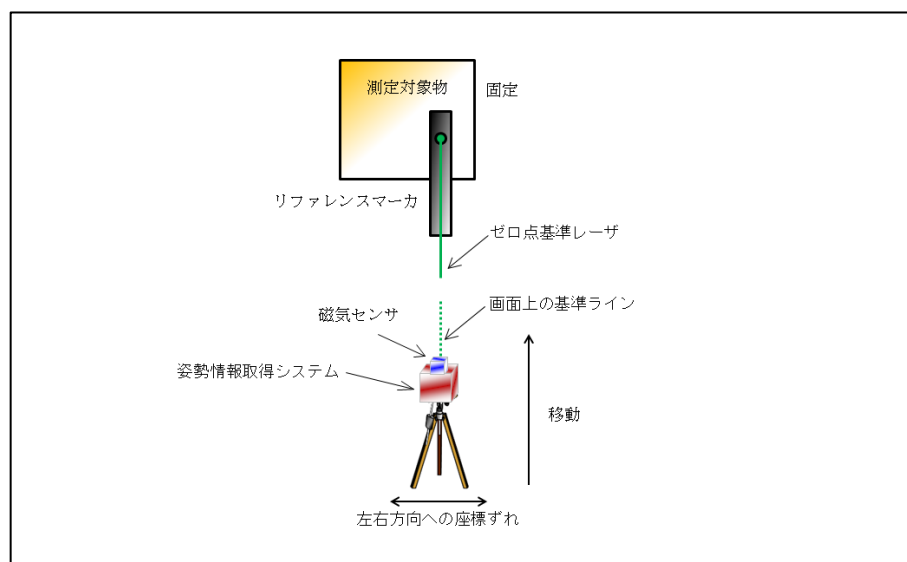


図 4-3 磁気センサの移動方向の座標調整

次に、姿勢情報における回転角の読み取り誤差は、リファレンスマーカと姿勢情報取得システムまでの距離が遠いほど回転角情報の S/N 比が向上する。

図 4-4(a)(b)は回転角と読み取り誤差の関係を示した図である。図 4-4(a)(b)のように読み取り誤差 1mm の光学装置がある場合、回転角が 0.1 度ずれたとき、距離 1m ではレーザー光が 3.49mm 動くが、距離 10m では 34.9mm 動く。それに対して読み取り誤差は 1mm であるため、距離が遠いほど相対的に S/N 比が向上する。そこで、本章の試作機では回転角情報の精度向上のため、リファレンスマーカに反射鏡を取り付け、磁気センサ側から照射したレーザー光を反射させて光学装置で読み取る手法を採用している。これにより、磁気センサから測定対象物までの距離が実距離の 2 倍確保でき、高い S/N 比を得ることができる。なお、図 4-5(a)(b)に今回試作したリファレンスマーカと姿勢情報取得システムを示す。

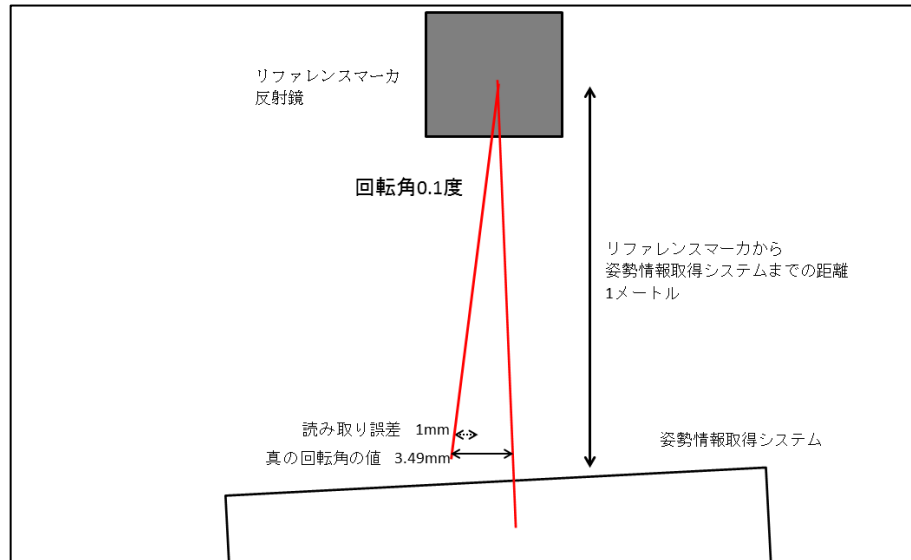


図 4-4(a) 距離 1m の場合の真値に対する読み取り誤差

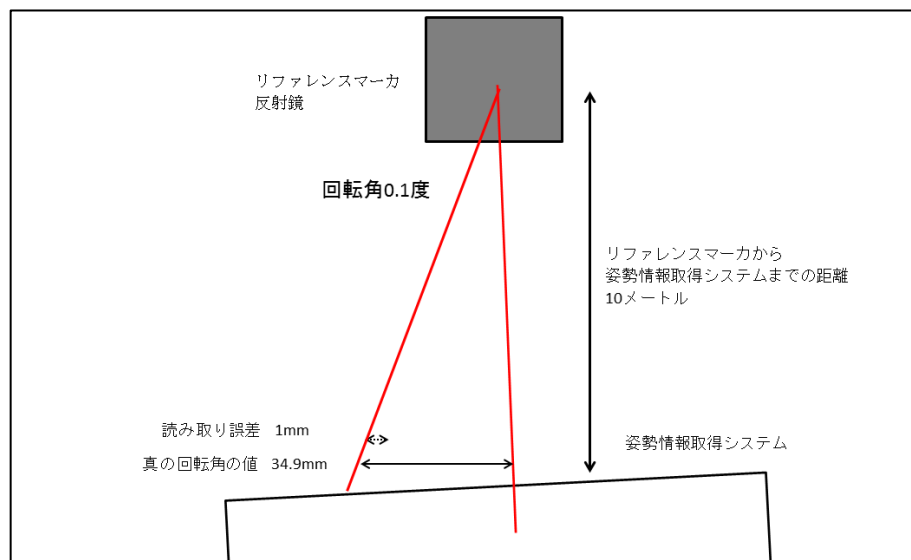


図 4-4(b) 距離 10m の場合の真値に対する読み取り誤差



図 4-5(a) リファレンスマーカー試作機



図 4-5(b) 姿勢情報取得システム試作機

次に画像処理による回転角の取得方法を示す。図 4-6 は図 4-2 の装置により得られた画像である。画像サイズは幅 640×高さ 480 ピクセルである。そのうちレーザ受光範囲は幅 153mm×高さ 153mm であり、画面上で約幅 480×高さ 480 ピクセルとなる。2 つのゼロ点基準レーザを基準ライン上に配置した際に、回転角レーザ光が同一ライン上にある状態を基準となる座標とし、回転角 0 度として図 4-6(a)に表す。図 4-6(b)(c)(d)は回転角を 0.1 度、0.2 度、0.5 度の順に変化させた際の画像である。図 4-6 から回転角の増加に伴って回転角レーザのスポット光が基準ラインから離れることがわかる。このように回転角レーザのスポット光の重心位置と基準ライン間のピクセル数から回転角を求めることができる。この装置のスポット光の 1 ピクセル毎の移動距離は、およそ $\frac{153}{480} = 0.318\text{mm}$ となり 3 章で目標に挙げた $\pm 0.3\text{mm}$ とほぼ同等である。なお、実際の画像処理ではこのピクセル数は整数ではなく、サブピクセル精度で演算される。スポット光の重心のピクセル位置はサブピクセルにより小数点以下の精度で求めることができ、実際の画像処理の距離分解能は 0.318mm のよりも細くなる。画像処理ではカメラで得た動画を VC++で製作したソフトウェアで解析する。フィルタリング、重心計算、二値化処理などは OpenCV を利用して行う⁽⁶⁾。こうして得られた回転角を実測回転角とする。

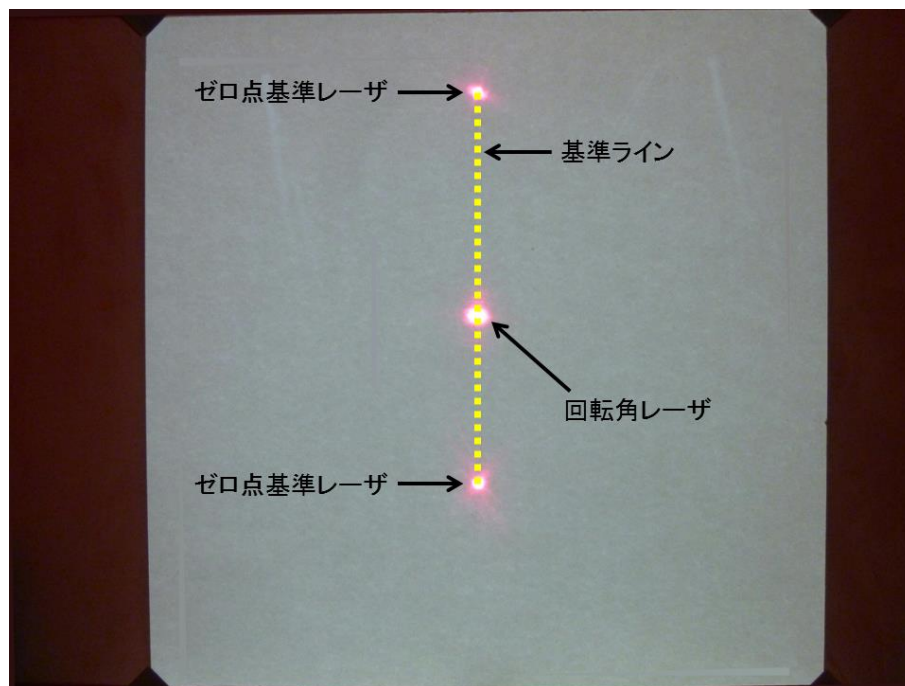


図 4-6(a) カメラへの入力画像(実測回転角 0 度)

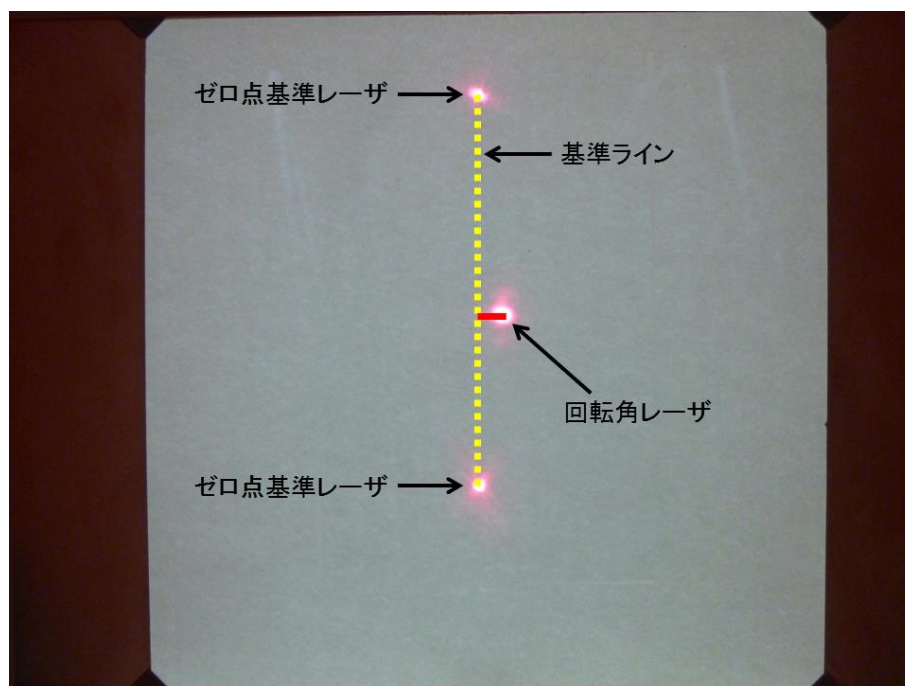


図 4-6(b) カメラへの入力画像(実測回転角 0.1 度)

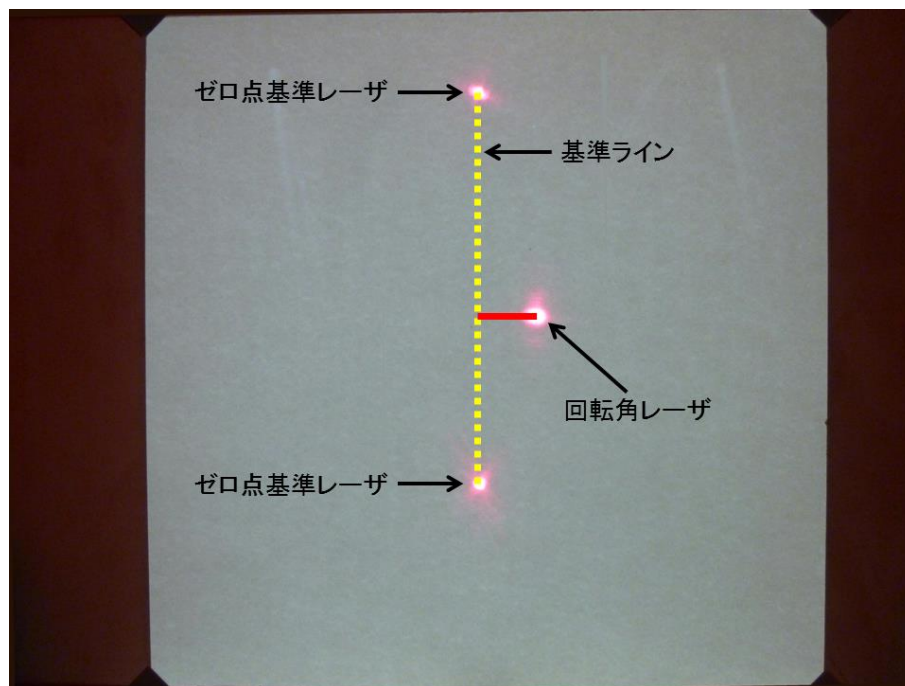


図 4-6(c) カメラへの入力画像(実測回転角 0.2 度)

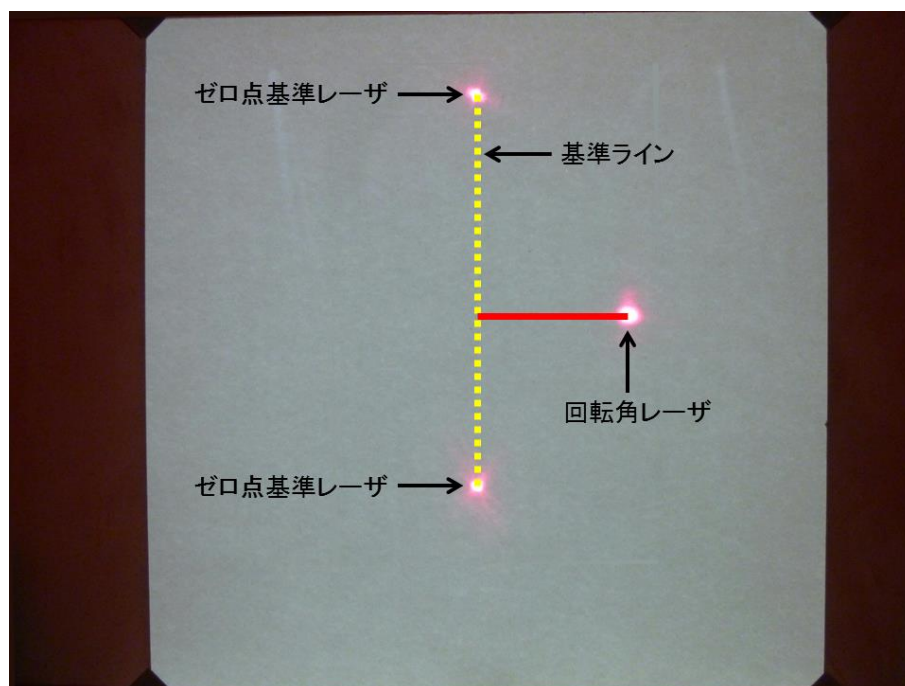


図 4-6(d) カメラへの入力画像(実測回転角 0.5 度)

4.4 姿勢情報取得システムの性能評価実験と結果考察

本実験では図 4-2 で示した(h)姿勢情報取得システムの精度を確認する。角度 0 度から 0.5 度まで姿勢情報取得システムを回転させ、得られた実測回転角のデータを記録する。確認のためには真値と実測回転角の比較が必要である。そこで、本研究では真値の代わりとして磁気センサ(メーカー：エムティアイ、型名：FM-3500)を用いる⁽⁷⁾。この磁気センサは 0.001 度まで角度を測ることができる。この磁気センサを用いて計測した角度を基準回転角とする。本実験では測定対象物を設置せず基準回転角と実測回転角の比較を行う。図 4-7 は姿勢情報取得システムによって得られた実測回転角と基準回転角を比較したグラフである。きれいな直線となっており今回の光学装置によって正しく回転角を測れることがわかる。表 4-2 は、基準回転角に対して、実際に画像処理で得られた実測回転角の値であり、回数は基準角度毎に 10 回ずつ施行する。この実測回転角と基準回転角との差を図 4-8 に示す。この図は基準回転角と角度誤差の関係を表す。ここで角度誤差とは基準回転角から実測回転角を引いたものである。各基準回転角において角度誤差の計測を行い、そのばらつきをこの図 4-8 に表している。例えば基準回転角 0 度における角度誤差は -0.005 度から +0.011 度の範囲となる。これが姿勢情報取得システムの実測回転角の精度である。

表 4-2 基準回転角に対して得られた実測回転角の値(各 10 回施行)

試行回数	基準回転角(度)					
	0.000	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500
1	-0.005	0.098	0.200	0.301	0.400	0.498
2	0.005	0.102	0.201	0.295	0.402	0.510
3	0.004	0.101	0.201	0.301	0.411	0.510
4	0.001	0.109	0.207	0.299	0.411	0.505
5	-0.005	0.097	0.207	0.298	0.408	0.511
6	-0.003	0.104	0.196	0.303	0.407	0.500
7	0.011	0.103	0.202	0.298	0.408	0.507
8	0.008	0.098	0.203	0.302	0.407	0.510
9	0.007	0.098	0.200	0.302	0.410	0.510
10	0.002	0.098	0.199	0.301	0.410	0.498

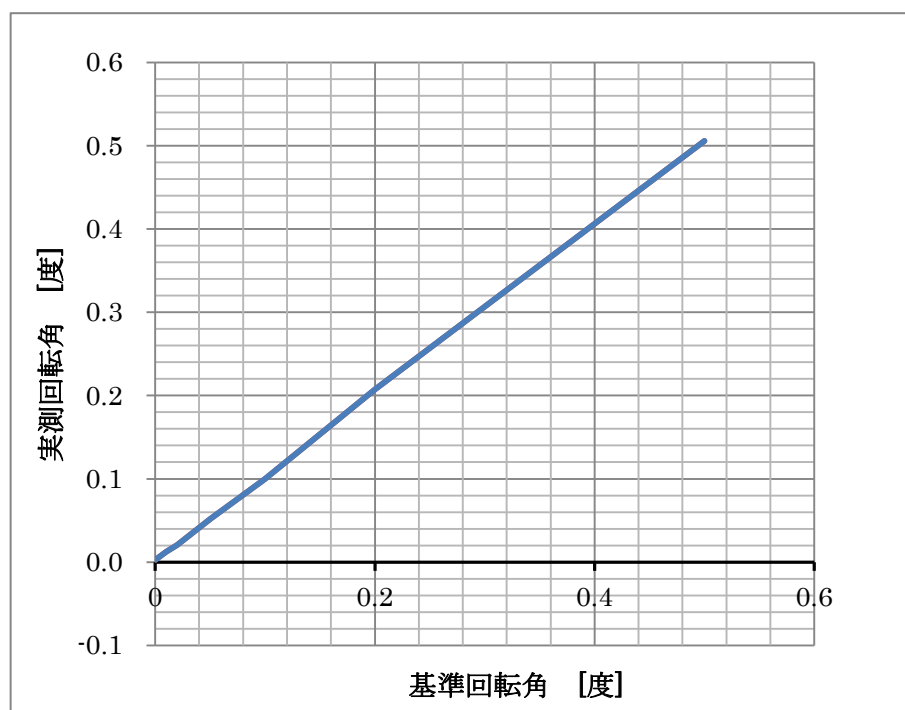


図 4-7 実測回転角と基準回転角を比較したグラフ

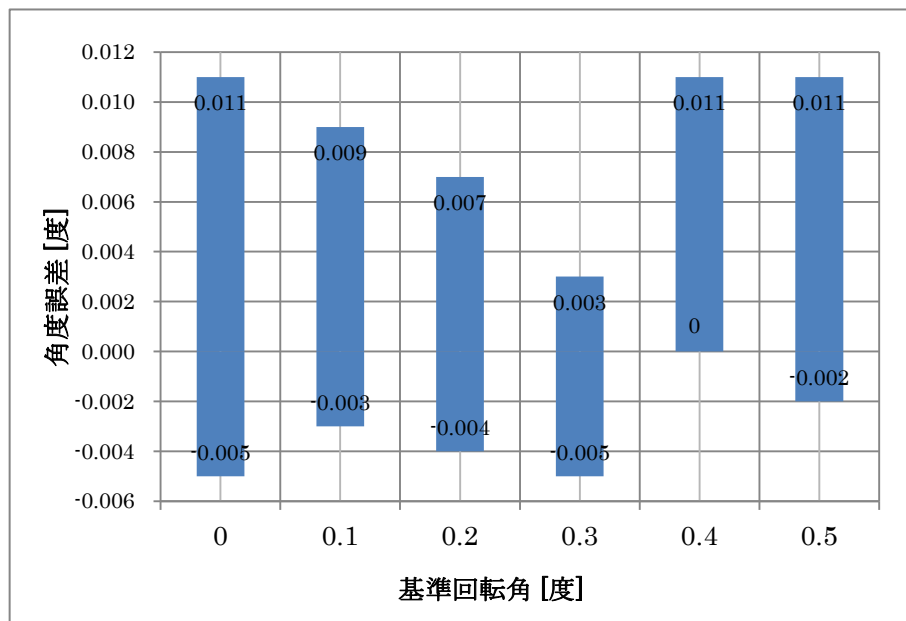


図 4-8 基準回転角に対する角度誤差のばらつき

次に、この角度誤差を磁気計測誤差へ置き換える方法を考える。本実験では基準回転角 0 度を地磁気の磁北に合わせ磁気センサの X 軸方向とする。測定対象物を設置しない条件で、実測回転角 θ で設置した磁気センサがあるとする。このとき、実測回転角には角度誤差 $\Delta\theta$ が含まれているため、磁気センサの X 軸成分 E_x' は次の式(4.1)で表される。なお、 E_m は地磁気の X 軸成分と Y 軸成分の合成値であり、その磁束密度は日本国内ではおよそ 30000nT 程度となる。

$$E_x' = E_m \cos(\theta + \Delta\theta) \quad (4.1)$$

角度誤差がない場合の X 軸成分は $E_x = E_m \cos(\theta)$ であることから、 $E_x - E_x'$ を θ (0-90 度)において計算することで、磁気計測誤差は約 ± 5 nT 誤差範囲であることが分かる。本研究では地磁気以下の領域での磁気測定を目的としているため、実際に測定対象物が存在する場合の E_m' は最大でも $0 \sim 2E_m$ 程度となる。その場合、磁気計測誤差は約 ± 10 nT の誤差範囲となる。

4.5 移動式磁気計測システムの性能評価実験と結果考察

開発した移動式磁気計測システムの試作機に対して、FM-3500 の磁気センサ出力を基とした任意の基準回転角を与え実際に磁気計測データに補正を加えて、その性能の評価を行った。図 4-9 は評価実験の概略図である。外乱の磁気ノイズや磁気センサ近傍の磁気の影響を完全に除去するため、地磁気の代わりとして、磁気センサにヘルムホルツコイルを使用して発生させた磁気を印加する。磁気の印加前にもともとの環境の磁気をすべて 0 に電氣的に打ち消し、ヘルムホルツコイルによる磁気の変化量のみを捉えるものとする。これを基準磁気として設定し基準回転角 0 度の際の X 軸、Y 軸の磁束密度を $X:30000\text{nT}, Y:0\text{nT}$ とし基準磁気とする。次の表 4-3 は基準回転角を与えられた場合の磁気センサ出力の理論値である。表 4-4 は基準回転角を与えられた場合の実測回転角及び実測した磁気計測データで、そのデータに補正演算したのが表中の演算値の磁気データである。各補正演算には式(3.1)-(3.7)を使用する。なお、水準器により水平を保っているため Z 軸の成分は、移動にかかわらず一定の値である。補正演算による磁気データは、姿勢に変化がない場合の磁気データを表しており実測回転角等の誤差が少ない場合には、基準磁気($X:30000\text{nT}, Y:0\text{nT}$)に近づいて行く。この実験における補正演算後の磁気データの最大誤差値は -3.2nT である。この結果、姿勢情報取得システムで検討した精度の範囲に収まることが確認できた。

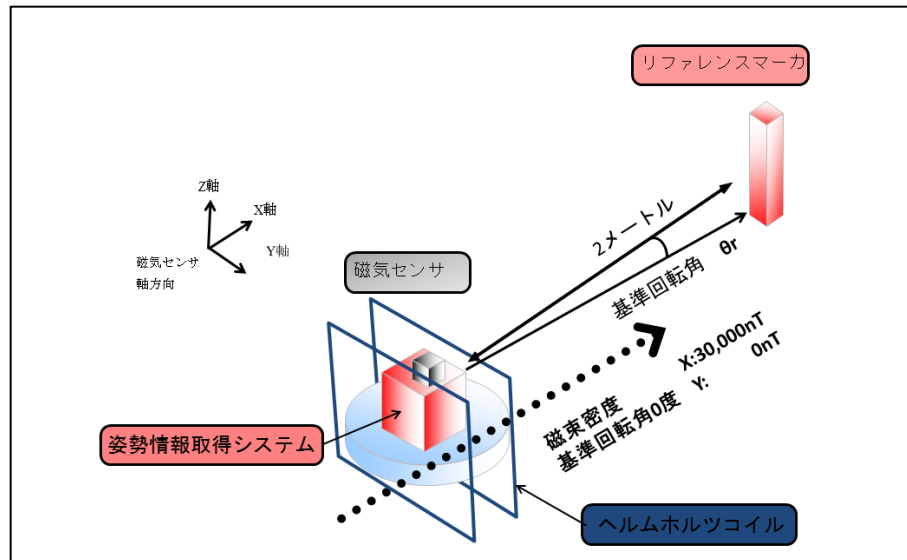


図 4-9 磁気発生コイルを使用した評価実験の概略図

表 4-3 基準回転角に対する磁気センサ出力の理論値

磁気 データ	軸	基準回転角(度)					
		0.01	0.02	0.05	0.10	0.20	0.50
理論値 (nT)	X	30000.0	30000.0	30000.0	30000.0	29999.8	29998.9
	Y	-5.2	-10.5	-26.2	-52.4	-104.7	-261.8

表 4-4 実測回転角と磁気計測データ及び補正演算後のデータ

磁気 データ	軸	実測回転角(度)					
		0.008	0.018	0.050	0.101	0.200	0.498
実測値 (nT)	X	30000.0	30000.0	30000.0	30000.0	29999.8	29998.9
	Y	-3.0	-12.0	-27.0	-51.0	-102.0	-264.0
演算値 (nT)	X	30000.0	30000.0	30000.0	30000.0	30000.0	30000.0
	Y	1.2	-2.6	-0.8	1.9	2.7	-3.2

4.6 結言

本章では、3 章で判明した要求性能に基づいて姿勢情報取得システムを検討し試作機の開発を行った。まず姿勢情報取得システムの開発ではリファレンスマーカに基準角レーザや、反射鏡を採用した。これにより姿勢情報の認識性能を向上させることができた。そして、姿勢情報取得システムの性能を確認し、移動式の磁気計測においても分解能 10nT での計測に必要な精度を有する、姿勢情報取得システムが開発できた。さらにその姿勢情報取得システムを用いて実現できる移動式の磁気計測システムの性能を確認する実験を行った。開発した磁気計測システムに任意の回転角を与えながら実際に磁気計測を行い、その値を補正演算し、事前に予想した磁気計測精度を満たす結果が得られた。この結果、本章で提案した光学装置を使用することにより、 10nT の分解能を持つ移動式磁気計測システムを開発することができた。

参考文献

- [1] 小幡実緒，春山真一郎，中川 正雄，「可視光 ID システムと 6 軸センサを用いた高精度位置推定手法の提案」，電子情報通信学会技術研究報告：信学技報，Vol.106，No.578，2007
- [2] 大沢孝，種子島一史，木下英彦，滝田英徳，「地磁気センサの応用」，三菱電機技報，Vol.66，No.9，pp.37-43，1992
- [3] 青柳桂一，「センサ技術の現状と課題」，国交省 第 2 回社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会資料，pp.2-10，2013
- [4] 中村国法，寺裏浩一，山口博章，傘谷 正人，松田正則，齊藤公昭，「光分岐方式の小型高機能レーザ墨出し器」，パナソニック電工技報，Vol.57，No.2，pp.64-69，2009
- [5] 福地健太郎，「レーザポインタの軌跡を追跡する 映像パフォーマンス向け遠隔入力システム」，情報処理学会論文誌，Vol.49，No.7，pp.2712-2721，2008
- [6] 永田雅人，「実践 OpenCV－映像処理&解析－」，カットシステム，pp.20-68，2009
- [7] 株式会社エムティアイウェブサイト
http://mticorp.co.jp/product/gaussmeters/fm3_super，「製品情報」，磁界測定器 FM-3500

第5章 移動装置の検討とコントローラ用タッチパネルスイッチの研究開発

5.1 緒言

本章では3章4章で検討開発を進めた移動式磁気計測システムで使用する移動装置とそのコントローラについて検討を行う。移動式磁気計測システムにおいて移動装置の効果的な運用を考えると、どのような移動装置でも課題となるのが、その操作性である。特に空中での操作では三次元での操作が必要となり、一般の操作用コントローラを使った操縦では熟練した技術が要求される場合が多い⁽¹⁾。そこで、本章では移動装置を容易に操作できるコントローラを検討し、そのために必要となるフレキシビリティの高いタッチパネルスイッチの研究を行う。このような周辺技術と、新しい磁気計測手法を組み合わせる様々な用途に移動式磁気計測システムを提案する。

5.2 移動装置及びコントローラの検討

3章、4章で研究開発した移動式磁気計測システムの試作機はすべて手動によって移動させてきた。ここからは、今後の移動式磁気計測システムの実用化も視野に入れて移動装置の検討を行う。2章3章で提案した移動式磁気計測システムは、測定対象物が人に運べないほどに大きいとき、最も効果を発揮する磁気計測手法である。大きな測定対象物の磁気分布を計測するのに用いる手法であるため、当然その移動装置には高さ方向への移動が求められる。地上面を移動する車両型の装置は安定性が高く、価格も安価であるが、前述の高さ方向への対応及び床の勾配などによって水平の維持が難しいという問題がある。ホバークラフト型であれば水平の維持の

問題は改善するが、高さ方向の問題が残る。空中へ移動できる装置においても、飛行機型は任意の場所で停止できず、飛行船型では機動性に問題がある。このような場合、ドローン型やヘリコプタ型の移動装置を用いることが有効と考えられる。ここでは近年急速に普及しているドローンの使用が望ましいと考えられる⁽²⁾。ドローンなど三次元の移動が可能な装置の場合、一般的にプロポといわれるような操縦用のコントローラでの操作は複雑で、難度が高い。本章では、移動式磁気計測システムに最低限必要な操縦のみが行える、簡易操作コントローラを検討する。このコントローラでは昇降、前後移動、左右移動、左右旋回、無入力で静止という 5 種類の入力で操作する。複雑な移動の必要がない移動式磁気計測システムでは 5 つの操作を、2 つ同時に行えないように制限することで、より操作を単純化する。工場に設置されている天井クレーンの動きに旋回を足した操作となる。天井クレーンと大差ない操作であるため、図 5-1 に示すようなハンディ型ボタンコントローラも考えられるが、ここでは操作者が三次元の移動方向を直感的に理解できるよう、球形コントローラを検討する。図

5-2(a)(b)(c)にその概略図を示す。片手で握れる程度の球体の表面にタッチパネルスイッチを張り付けて入力装置とする。タッチパネルなので操作者は軽く触れるだけで操縦が可能となる。なお、簡易な移動しか必要としない移動式磁気計測システムの運用上、操作頻度が少ない左右旋回は 2 か所の同時入力とすることで、旋回の誤入力を軽減する。本章の研究では、インターフェイス単体としての可能性を広げるため、入力インターフェイスにボタン型スイッチではなく、容易に増設、変形が可能なタッチパネルスイッチの使用を検討する。この改良型タッチパネルスイッチであれば、球形だけでなく様々な形状のコントローラも実現可能である。さらに、複雑

な三次元移動の操縦でも直感的に行える柔軟性の高いコントローラも実現できる可能性がある。また物体の表面に張り付けられる入力インターフェイスなどとして、様々な用途で利用できる。ここでは、過去に提案された増設、変形機能を持ったタッチパネルスイッチの改善を行い、その実用化を進めることとする。

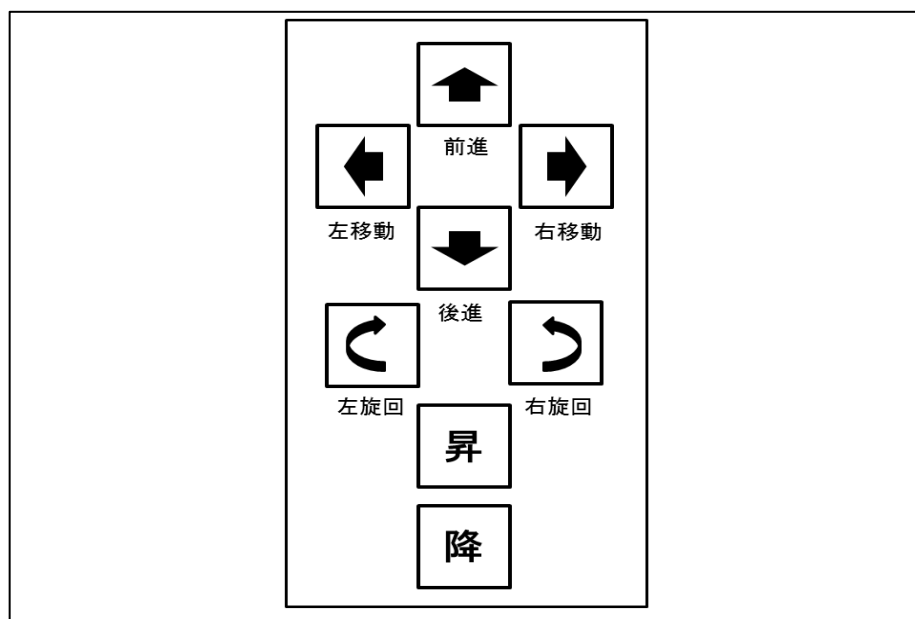


図 5-1 ハンディ型ボタンコントローラ

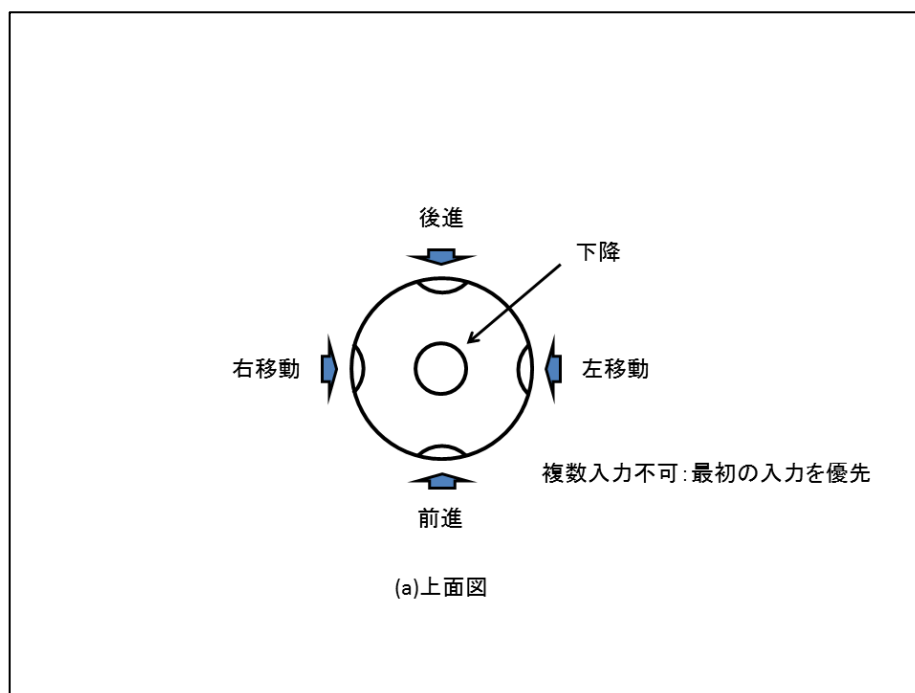


図 5-2(a) 球形コントローラ 概略図

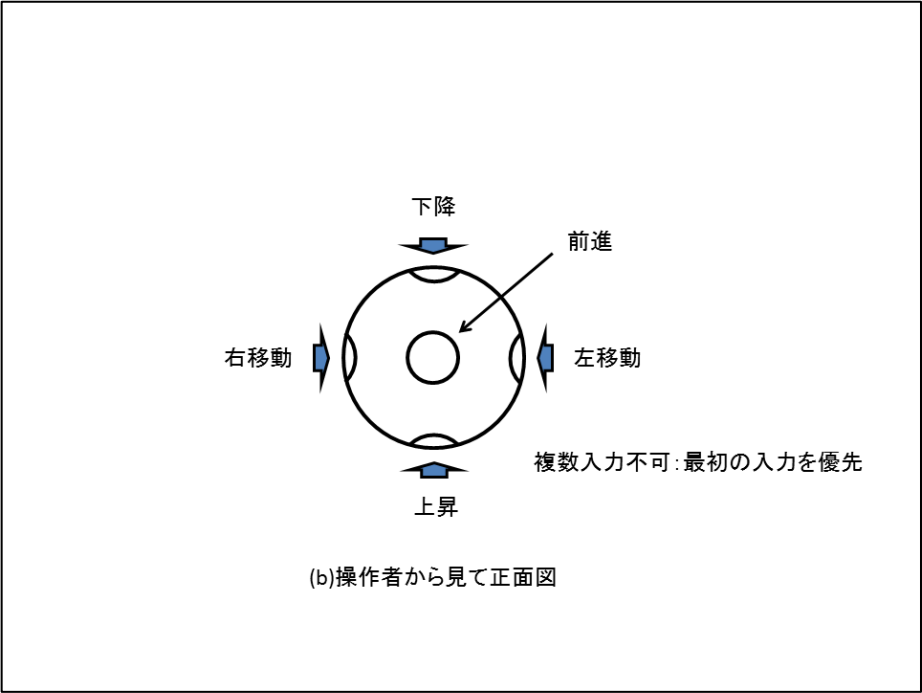


図 5-2(b) 球形コントローラ 概略図

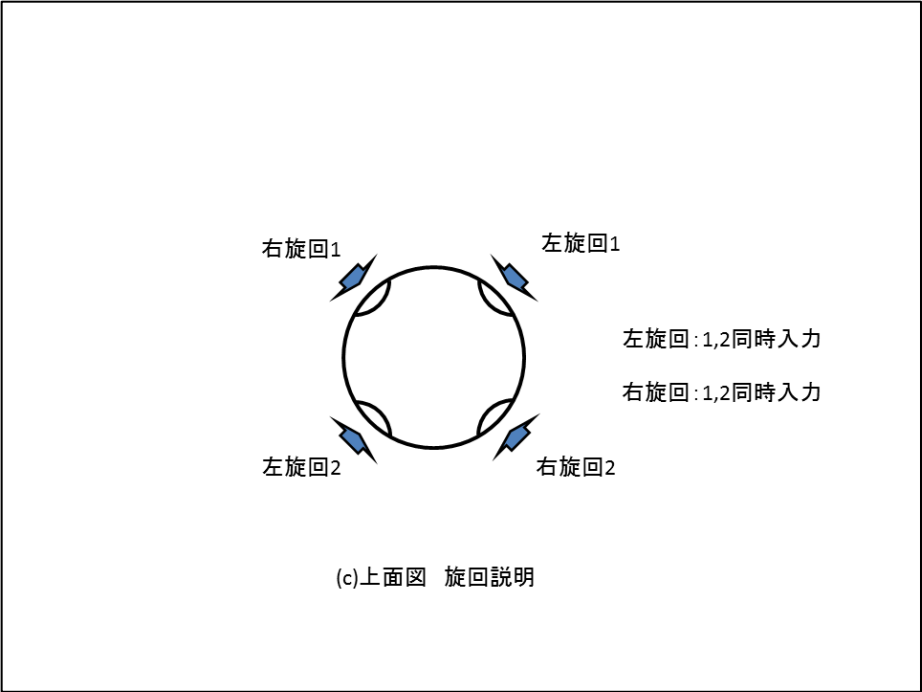


図 5-2(c) 球形コントローラ 概略図

5.3 入力用インターフェイスの検討

近年、電子機器などの入力インターフェイスには様々な方式が採用されている。例えばスイッチ入力、音声入力、モーション入力等様々ある(3・5)。タッチ・スクリーンもその一つであり、タッチしたスクリーン上の座標を検知するセンサである。最近では携帯ゲーム機の入力インターフェイスとして抵抗膜式のタッチ・スクリーンが採用されている。スマートフォンなどには、静電容量式のタッチ・スクリーン等が使用されている。今回はタッチ・スクリーン方式のインターフェイスの中でも、フレキシビリティ、ユーザビリティに優れた、曲げおよび追加機能を備えたタッチパネルスイッチの検討、改良を行う(6)。

この従来型のタッチパネルスイッチはシンプルな仕組みでかつ非常に柔軟性が高いことが特徴である。特にパネル枚数と形状の自由度が組み合わさることで、平面だけでなく曲面に対しても、インターフェイスとして設置可能である。これにより、球形はもちろん体に貼り付ける様に設置するウェアブル入力装置や、対象物の全面に設置することでシンボライズされた入力装置としても利用できる。しかし、従来型タッチパネルスイッチはそのシンプルさゆえに、表皮効果、静電容量の変化、環境ノイズといった要因に対処が難しく S/N 比が低くなってしまう場合がある。そのため、増やせるパネル枚数には事実上の制限があった。その従来型の S/N 比の問題に対し、改良案が提示された(7)。これは、従来型の検知部に数段の電子回路を組み込むことで、飛躍的に S/N 比を改善し、パネル枚数を大幅に増やすことをシミュレーションで提案している。しかし、この追加型で提案される従来回路方式では

(1) 部品点数及び接続線数の多さ

(2) シミュレーションのみでの確認

という実用化への課題があげられる。

本研究では、従来型のタッチパネルスイッチの改良のため、

(1) 従来回路方式から使用線数と回路部品数を削減し、より簡素化した新回路方式を提案。

(2) 新回路方式による実機を製作し、シミュレーションだけでなく実際の装置で改良効果を確認。

上記の結果従来型のタッチパネルスイッチの実用化への道筋をつけることができたので、以下に詳細を説明する。

5.4 提案する手法

図 5-3(a)-(c)は、追加型タッチパネルで提案された従来型回路方式に対して本研究の有効性を確かめるため、新回路方式で提案する回路図である。全体は 2 パートに分けられ図 5-3(a)が装置の全体ブロック図、図 5-3(b)が励起検出部、図 5-3(c)はタッチパネル部となる。本章で提案するインターフェイスは 1 つの励起検出部と、複数のパネル部とで構成される。

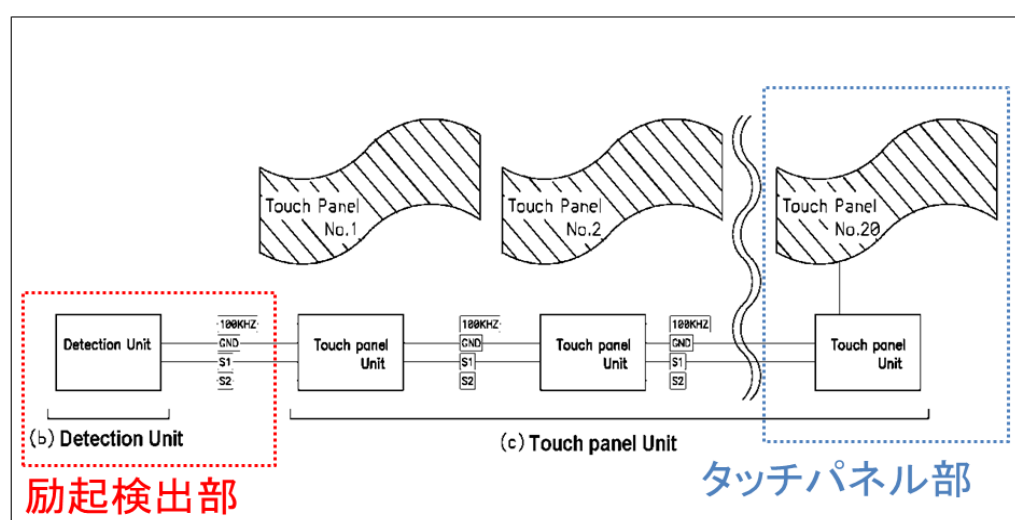


図 5-3(a) 装置全体のブロック図

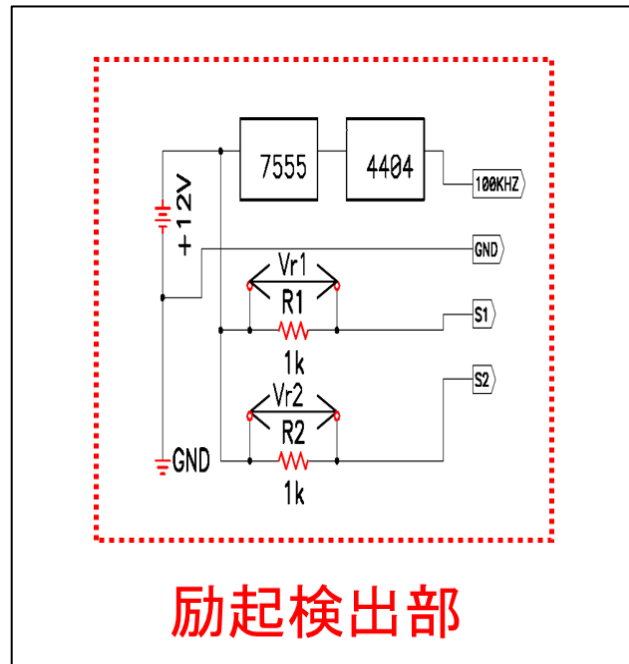


図 5-3(b) 励起検出部の回路図

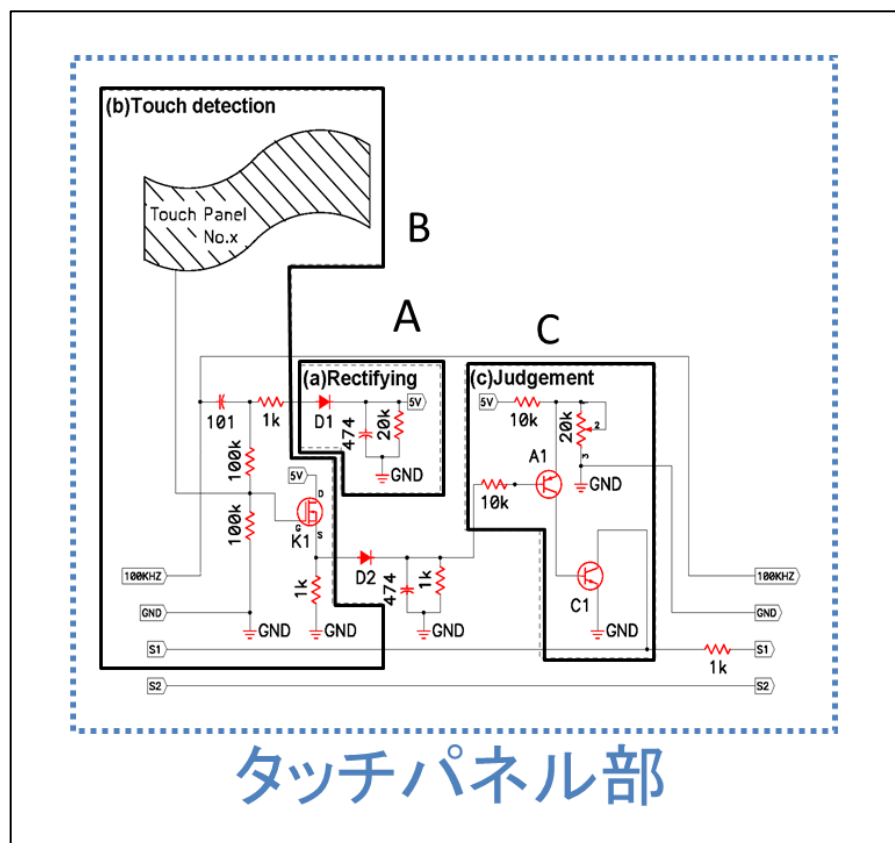


図 5-3(c) タッチパネル部の回路図

表 5-1 は従来回路方式と今回提案する新回路方式とを使用する接続線数、部品点数で比較した表である。表 5-1 に示す通り今回提案する回路方式では、接続線数、部品点数ともに減少する。使用する接続線数において、従来方式の 5 本に対して今回の回路方式では 4 本。部品点数はオペレーショナルアンプに最低 10 個程度のトランジスタが内蔵⁽⁸⁾されるとして、従来の部品点数 42 個に対して今回は 17 個となる。

表 5-1 従来回路方式との提案回路の比較表

	接続線数	部品点数
従来回路方式	5 本	42 個
新回路方式	4 本	17 個

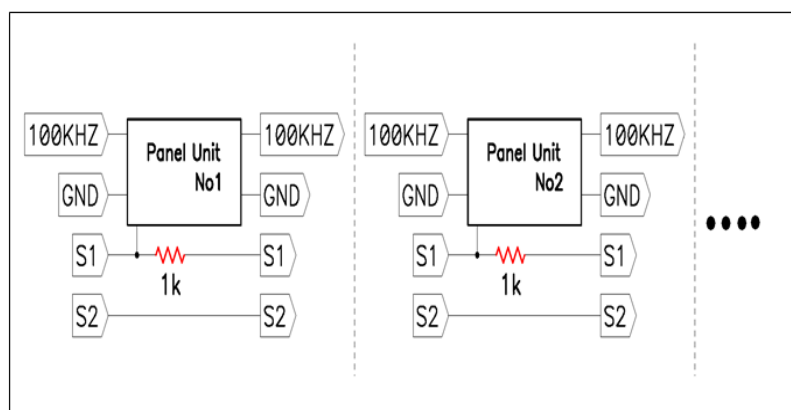


図 5-4 接続ブロック図

図 5-4 は、パネルとパネルとを繋ぎ増設していく際のブロック図である。従来回路方式では 5 つ必要であった接続線数を、今回提案する新回路方式では 4 つの接続線で行えるよう改良している。この接続線数の軽減を実現することで、パネル増加時には大きなコスト減が見込まれる。図 5-3(c)で

示すように 4 つの接続線は、励起信号（100kHz 矩形波）、GND 線、信号線 1、2 となる。今回の新回路方式では、人体の静電容量に反応させるための 100kHz 励起信号を分岐させて、整流して直流信号に変え、判定用直流信号として使用する。これにより従来回路方式の 5 つの接続線による提案を、4 つの接続線回路方式として改良提案する。次に、追加する整流回路に簡素な回路を使用することで、部品点数、製作工数を抑制する。図 5-3(c)の A 整流部、B 検知出力部、C 判定部の各パートを個別に表したものが図 5-5(a)(b)(c)である。図 5-5(a)では整流部を示している。ここでは、直流電源 5V を励起信号（100kHz 矩形波）から発生させる。この図 5-5(a)から理解されるように、回路は非常にシンプルあり部品点数を減らしている。この回路を用いることで、従来モデルで必要であった直流電源の接続線を減らすことができる。次に、図 5-5(b)で現される指先からの静電容量の変化による検知入力部には FET トランジスタ 1 個による検出を提案する。これにより回路の消費電力低減と回路の簡素化を提案する。線数削減と同様にこの省力化も枚数増加時には大きな改良効果を得ることができる。図 5-5(c)で示す判定部もトランジスタを使用することで簡素化を行った。これにより検知部、判定部にオペレーショナルアンプを使用する追加型の従来回路方式と比べ、新回路方式では回路全体で使用される部品点数は 1/2 程度に低減できる。

これらの改良を組み込んだ新回路方式を用いて製作した実機が図 5-6 である。これをテスト用実機と呼ぶこととする。テスト用実機では基板サイズや使用する部品に制限があるため、指による接触部とパネル回路部とを別々に組み込んでいる。これを 20 枚製作し S/N 比の改良効果の確認と実機による評価実験を行う。

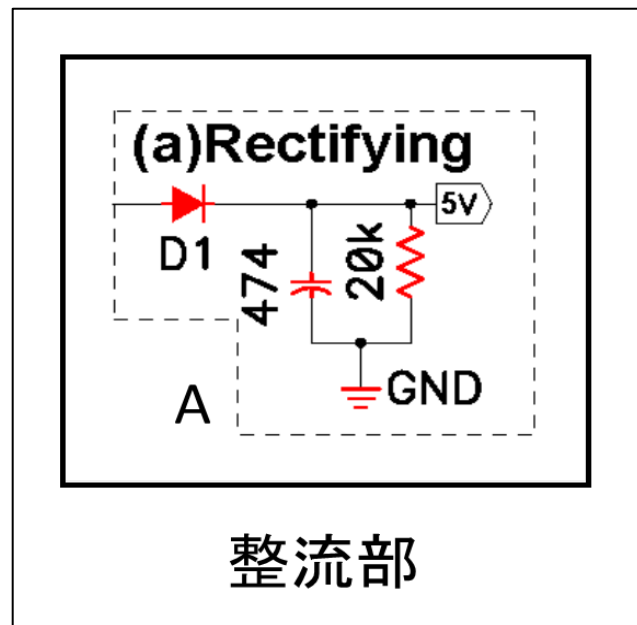


図 5-5(a) 整流部の回路図

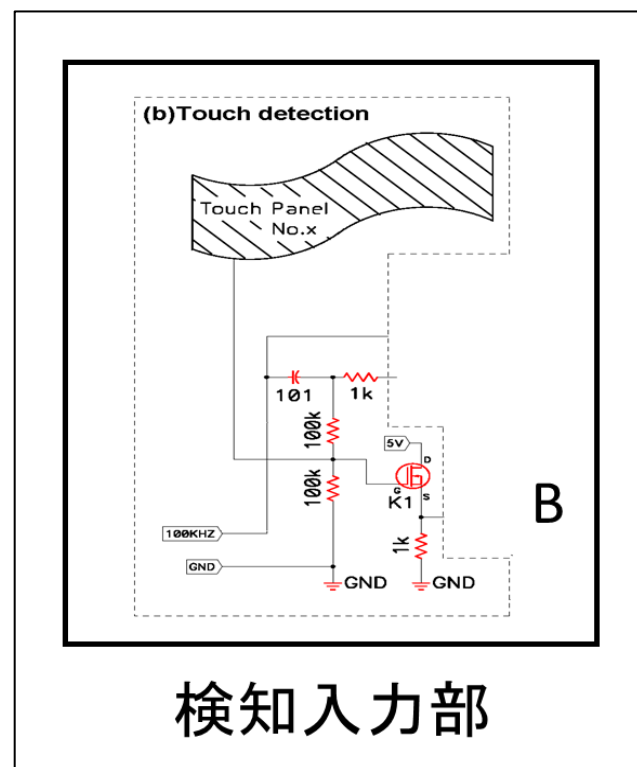


図 5-5(b) 検知入力部の回路図

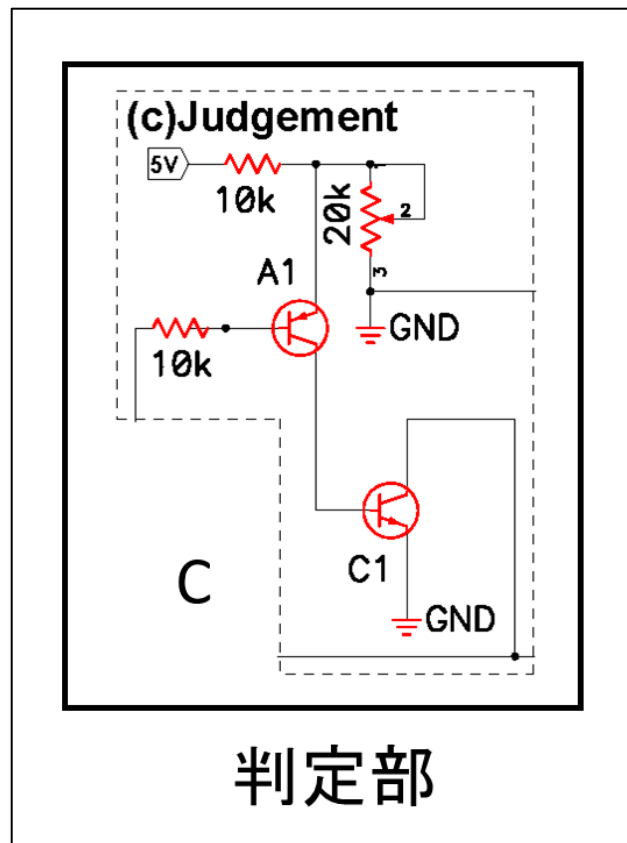


図 5-5(c) 判定部の回路図



図 5-6 テスト用実機写真

5.5 性能評価実験

5.5.1 タッチパネル位置の確認実験の結果と考察

図 5-6 のテスト用実機を用いて、実際にタッチしたパネル位置を確認する実験を行う。テスト用実機と評価用データレコーダとを組み合わせて評価を行う。データレコーダでは 1MHz サンプリングによる 2ch 同時計測を行う。評価用信号入力には図 5-3(b)の検知用抵抗 R1、R2 に流れる電流値、つまり R1、R2 の端子間電位差 V_{r1} と V_{r2} を利用する。 V_{r1}, V_{r2} をデータレコーダに記録し、表計算ソフトにてそのデータを集計解析する。その際に電波環境ノイズ対策として、高速フィルタリングを実施し、10 サンプリングのアベレージングを行い、 $10 \mu \text{ sec}$ あたりのデータにスムージング処理を行う。図 5-7 が 20 枚のタッチパネルを連続でタッチした際の V_{r1}, V_{r2} データである。ここではサンプリングタイムは $1 \mu \text{ sec}$ であり、タッチパネルの接触時間が約 1 ms (1000 サンプル)、非接触時間が約 2.5 ms (2500 サンプル) で 20 枚のパネルをタッチしている。ここで、図 5-7 の V_{r1}, V_{r2} を、図 5-3(b) の R1, R2 に流れる電流 i_1, i_2 と置き換えて評価を行う。この i_1, i_2 の電流比率 Ratio は以下の式(5.1)から求められる。

$$\text{Ratio} = \frac{(i_1 - i_2)}{(i_1 + i_2)} \quad (5.1)$$

この実際に計測した i_1, i_2 を、式(5.1)に代入し得られた Ratio と ΔRatio のグラフが次の図 5-8 である。ここで、パネル No.x 番目の Ratio とパネル No.x+1 の Ratio の差を ΔRatio とする。図 5-8 のデータから $x=11$ のときの ΔRatio の値が 0.0070 であるとわかる。本実験ではこの値が最も小さい ΔRatio であり、この値を最小値として、すべてのパネル位置を識別できた。ここで、この最小値を $\Delta \text{Ratio}_{\min}$ であるとする。実際には、同じパネルを

タッチしたとしても **Ratio** の値は毎回誤差分だけ変化する。次にこの誤差の最大値を ε_{\max} と定める。ここで、次の ($\Delta\text{Ratio}_{\min} > \varepsilon_{\max}$) の条件を満たすときに、各パネルは位置を識別できるといえる。これを次の 5.5.2 で明らかにしていく。

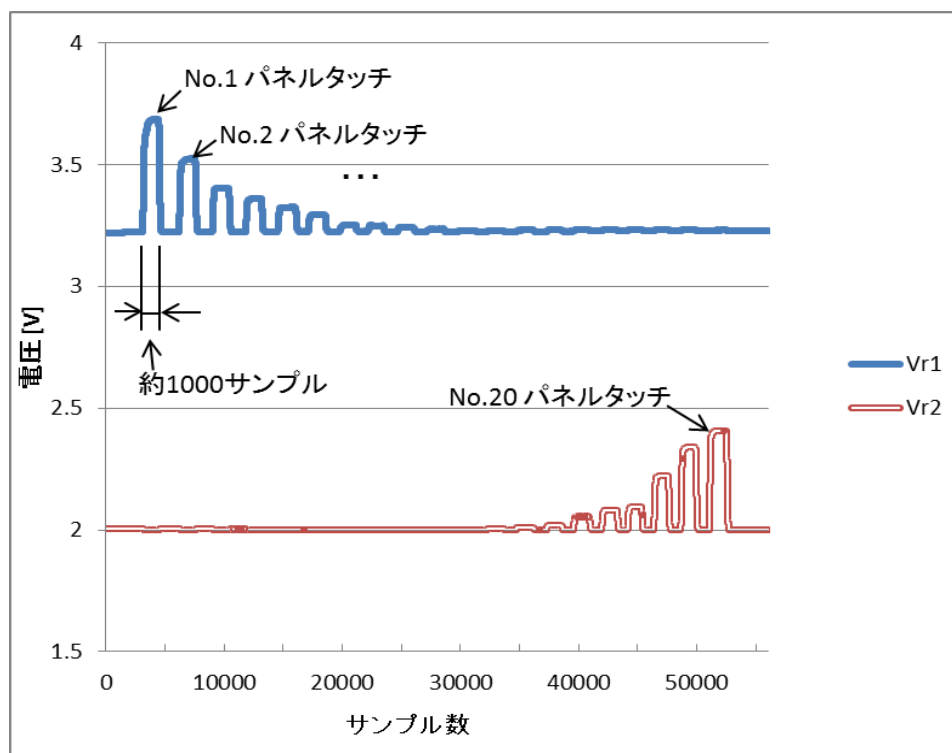


図 5-7 Vr1Vr2 の計測データ

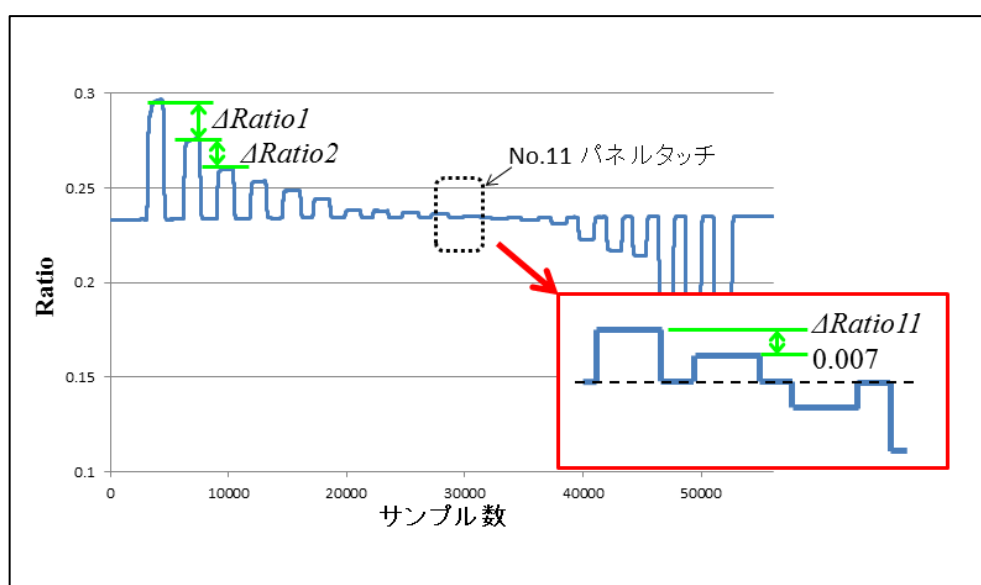


図 5-8 Ratio と ΔRatio の関係

5.5.2 最大パネル枚数検証実験の結果と考察

ここでは、この新回路方式を用いることで実際に何枚までパネルを増設できるかを確認する。今回の新回路方式のテスト用実機によって得られた検出信号のデータを用いて、解析理論的に最大何枚までパネルを増設できるかをシミュレートする。

まず誤差伝搬の法則を用いて、この装置における最大誤差 ε_{\max} を求めるための計算を行う。式(5.1)から **Ratio** は i_1 と i_2 の関数と考えられ式(5.2)で表すこととする。また、**Ratio** に対する i_1, i_2 に誤差要因 $\Delta i_1 \Delta i_2$ が含まれているとするならば、誤差を含む **Ratio_{err}** は式(5.3)で表すことができる。

$$\text{Ratio} = f(i_1, i_2) \quad (5.2)$$

$$\text{Ratio}_{\text{err}} = f(i_1 + \Delta i_1, i_2 + \Delta i_2) \quad (5.3)$$

式(5.3)をテイラー展開することで、以下の式(5.4)が得られる。

$$\begin{aligned} f(i_1 + \Delta i_1, i_2 + \Delta i_2) &= f(i_1, i_2) \\ &+ \frac{1}{1!} \left(\frac{\delta}{\delta i_1} \cdot \Delta i_1 + \frac{\delta}{\delta i_2} \cdot \Delta i_2 \right) \cdot f(i_1, i_2) \\ &+ \frac{1}{2!} \left(\frac{\delta}{\delta i_1} \cdot \Delta i_1 + \frac{\delta}{\delta i_2} \cdot \Delta i_2 \right)^2 \cdot f(i_1, i_2) \\ &+ \dots \end{aligned} \quad (5.4)$$

式(5.2),(5.3),(5.4)から誤差 ε は次の式(5.5)となる。

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \text{Ratio}_{\text{err}} - \text{Ratio} \\ &= f(i_1 + \Delta i_1, i_2 + \Delta i_2) - f(i_1, i_2) \\ &= \frac{1}{1!} \left(\frac{\delta}{\delta i_1} \cdot \Delta i_1 + \frac{\delta}{\delta i_2} \cdot \Delta i_2 \right) \cdot f(i_1, i_2) \\ &\quad + \frac{1}{2!} \left(\frac{\delta}{\delta i_1} \cdot \Delta i_1 + \frac{\delta}{\delta i_2} \cdot \Delta i_2 \right)^2 \cdot f(i_1, i_2) \\ &\quad + \dots \end{aligned} \quad (5.5)$$

式 5 に対して $f(i_1, i_2)$ を式 (5.1) に置き換え、非線形の項は値が十分に小さいため無視し、各項の絶対値をとることで最大誤差 ε_{\max} は次の式 (5.6) となる。

$$\varepsilon_{\max} = \left| \frac{2i_2}{(i_1 + i_2)^2} \cdot \Delta i_1 \right| + \left| \frac{2i_1}{(i_1 + i_2)^2} \cdot \Delta i_2 \right| \quad (5.6)$$

式 (5.6) と今回測定した電流値を使用して解析を行う。例としてテスト用実機のパネル No.1 に実際に試験者が接触した際の測定値のアベレージを i_1 , i_2 とする。また測定値の min・max 値を抜き出し、それぞれ $\Delta i_1, \Delta i_2$ とする。式 (5.6) に i_1, i_2 と $\Delta i_1, \Delta i_2$ を代入して最大誤差 ε_{\max} を求める。

$$i_1 = 3.66344, i_2 = 2.00176$$

$$\Delta i_1 = 0.05237, \Delta i_2 = 0.00053$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\max} &= \left| \frac{2 \cdot 2.00176}{(3.66344 + 2.00176)^2} \cdot \Delta 0.05237 \right| \\ &\quad + \left| \frac{2 \cdot 3.66344}{(3.66344 + 2.00176)^2} \cdot \Delta 0.00053 \right| \\ &= 0.006654 \end{aligned}$$

上記計算からパネル No.1 の最大誤差は 0.006654 との結果となった。上記の計算を全てのパネルで行った結果が次の表 5・2 である。

表 5.2 各パネルの最大誤差 ε_{\max}

No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
0.006654	0.002016	0.001656	0.003403	0.005871
No.6	No.7	No.8	No.9	No.10
0.004293	0.001473	0.003140	0.002271	0.001245
No.11	No.12	No.13	No.14	No.15
0.000756	0.001090	0.001899	0.004444	0.006198
No.16	No.17	No.18	No.19	No.20
0.003839	0.005481	0.005388	0.005307	0.006608

表 5-2 のデータにおいてパネル No.1 の ε_{\max} が 0.006654 で 20 枚中最大とわかる。ここから、パネルを増設した際の隣り合うパネル間の電流比率の最小値の差が、この 0.006654 に近づく時、このインターフェイスの S/N 比は小さくなり、各パネルの区別が困難になる。各パネル間の電流比率の最小値は隣り合うパネルにおける式(5.1)の解の差から求めることができる。隣り合うパネル x と $(x+1)$ 番目の Ratio の差は以下の式で表される。

$$\Delta\text{Ratio} = \text{Ratio}(x) - \text{Ratio}(x + 1) \quad (5.7)$$

なお、 $\Delta\text{Ratio}(x)$ については $\Delta\text{Ratio}(1) = \Delta\text{Ratio}(2) = \dots = \Delta\text{Ratio}(N - 1)$ の関係が成立する。表 5-3 に N が異なる場合の $\Delta\text{Ratio}(x)$ を表す。この式(5.7)の左辺に今回の最大誤差 ε_{\max} 0.006654 を代入し計算を行った時の最大枚数の解は約 298 となる。これにより本研究の回路方式を用いたテスト用実機では、理論的に最大 298 枚パネルで構成されたインターフェイスを作製可能と言える。

表 5-3 パネル枚数毎の ΔRatio

枚数 N	100	298	299	500
$\Delta\text{Ratio}(1)$	0.019608	0.006667	0.006645	0.003984

5.6 結言

本章では、従来型タッチパネルスイッチによるインターフェイスの実用化に向けて、実機の製作を行った。従来型タッチパネルスイッチから S/N 比を改良させた追加型タッチパネルスイッチに対し、新しい電子回路を提案し部品点数と接続線を削減した。さらに、いままでシミュレーションでのみ確認していた S/N 比の性能を、実機を製作及びその実機による実験により確認することで、大きく実用化に近づいた改良を提案することが出来た。今後はこのタッチパネルスイッチを使用したコントローラなどを利用して、移動式磁気計測システムのより効率的に運用できる移動装置を検討する。

参考文献

- [1] 玉田嘉紀, 「ドローンによる山岳遭難捜索技術報告書」, 日本山岳救助機構合同会社, pp.20-22
- [2] 久保大輔, 「無人航空機システム(ドローン)の歴史と技術発展」, 計測自動制御学会 計測と制御, 56(1), pp. 12-17, 2017
- [3] Plauche, Madelaine, Udhayakumar Nallasamy, Joyojeet Pal, Chuck Wooters, and Divya Ramachandran, "Speech Recognition for Illiterate Access to Information and Technology," International Conference on Information and Communication Technologies and Development (ICTD2006), Berkeley, 2006
- [4] Sho Yokota, Yasuhiro Ohyama, Hiroshi Hashimoto, Jin-Hua She, "The Electric Wheelchair Controlled by Human Body Motion - Design of the prototype and basic experiment-", Proceedings of the 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication RO-MAN2008, ISBN:987-1-42442213-5, pp. 303-308, 2008
- [5] Ministry of Internal Affairs and Communications : "As a result of 2013 communication use pulse-taking" Ministry of Internal Affairs and Communications information materials, pp. 9-12, 2014
- [6] Seiichi Serikawa, Lifeng Zhang : "Proposal of a touch panel switch with the function of bending and addition", 2nd International Conference on ICICI-BME, pp. 8-13, 2011

- [7] Mingyu Fan, Daisuke Tanaka, Akira Yamawaki, Seiichi Serikawa :
“Simulation of touch sensor switch control circuit”, The 3rd
International Conference on ICIAE2015, pp. 223-226, 2015
- [8] 吉澤浩和, 「CMOS OP アンプ回路 実務設計の基礎」, CQ 出版社,
pp. 109-110, 2007

第 6 章 移動式磁気計測システムの実用化に向けた検討

6.1 緒言

6 章では各章で検討開発を行った移動式磁気計測システムの実用化に向けた検討を行う。まず航空貨物など大型の測定対象物に対する、本システムの運用方法の検討を行う。ここでの磁気センサの移動装置は、姿勢情報取得システムを搭載したセンサスタンド型の移動装置とし、手動での移動を想定する。このシステムにおいて実用化に向けた検討を行う。つぎに、5 章で検討した移動装置と磁気計測を組み合わせた、ドローンを使用した移動式磁気計測システムを検討する。ここでは、不発弾の探査への使用を目的とし、不整地などでの不発弾探査での利便性を考慮した実用化を検討する。

6.2 手動による移動式磁気計測システムの実用化検討

ここでは、磁気センサ部を手動で移動させる、移動式磁気計測システムの実用化について検討を行う。開発及び製品化にかかる速度と製造コスト、装置の持つ有用性を考慮し、移動式磁気計測システムの実用化の第一歩として、手動での移動式磁気計測システムを検討する。

まず、磁気計測システムの構成を考える。第 3 章で示したとおり図 3-2(b)リファレンスマーカと図 3-2(h)姿勢情報取得システムで構成されるシステムとなる。ここで、実際の測定対象物について考える。航空貨物の上限サイズは航空会社によってことなるが、代表的な上限サイズで高さ 2.4m、幅 3m、奥行き 2.3m などである⁽¹⁾。ここでは、測定対象物のサイズを各辺が 1.5m 程度の立方体として検討を進める。このようなサイズの測定対象物に対しては最低 2 個のリファレンスマーカの設置により、作業効率を向上で

きる。次の図 6-1 に手動移動の磁気計測システムの概略図を示す。図のように、2 つのリファレンスマーカを平行に並べて使用する手法で検討する。この際リファレンスマーカ間の位置合わせはリファレンスマーカ用の基準レーザ、回転角レーザ、回転角レーザ反射鏡、基準ラインを使用する。リファレンスマーカの詳細を図 6-2 に示す。リファレンスマーカの両側面に基準レーザ、回転角レーザ、回転角レーザ反射鏡、基準ラインを設置し位置の調整を行う。この際、目測によって基準レーザ光と反射した回転角レーザを基準ライン上に合わせる。またリファレンスマーカの水平は水準器を使用して合わせる。2 個のリファレンスマーカを用意することで、最初に設置したリファレンスマーカの位置と角度を継承しながら、リファレンスマーカを移動させることが可能になる。なお、レーザ光と基準ラインを目測で判断した際の読み取り精度は、本論文の 3 章でおおよそ $\pm 0.8\text{mm}$ 程度であることが明らかにされており、リファレンスマーカ間の距離が仮に 300mm であった場合リファレンスマーカ間の角度の誤差は次のとおりである。

$$\tan^{-1}\left(\frac{\pm 0.8}{300}\right) = \pm 0.152^{\circ}$$

4 章で述べた通り、本姿勢情報取得システムは ± 1 度程度の範囲内でずれを補正するシステムであり、これを逸脱しない範囲であれば、基準となる磁束密度と角度を修正することで使用上の問題はない。そこで、リファレンスマーカはゼロ点基準レーザ $\times 2$ 、回転角レーザ反射鏡、リファレンスマーカ用の基準レーザ、回転角レーザ、回転角レーザ反射鏡とレーザ用のバッテリーで構成される。リファレンスマーカの部品コストは三脚スタンドと上記レーザ類を合わせても数万円で製作可能である。そのため、システム

として最初からリファレンスマーカを 2 個の装備することも視野に入る。
また特殊な部品は必要なく、一部加工品を除きすべての部品が市販品で準備できる。

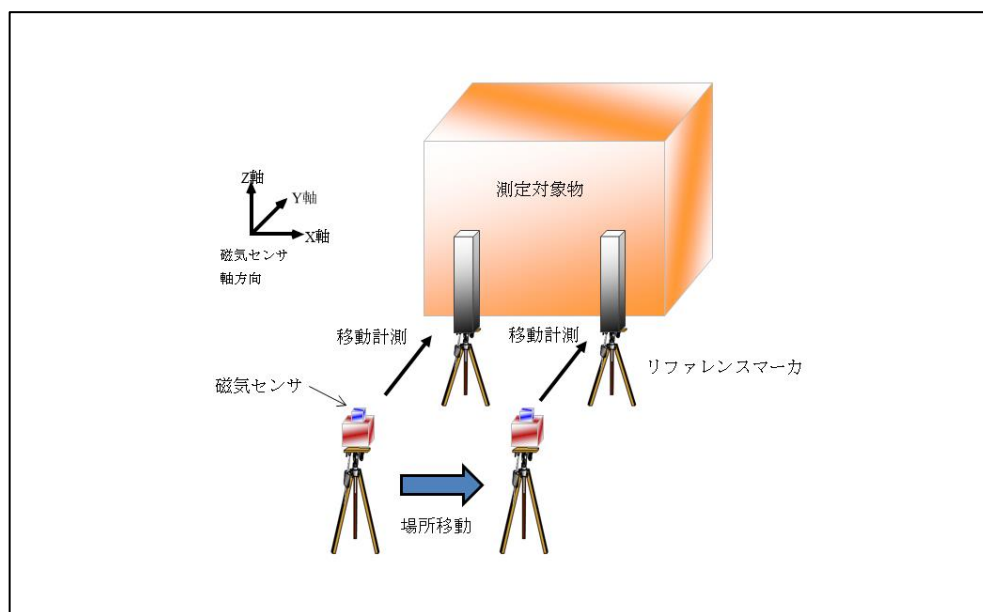


図 6-1 手動移動の磁気計測システムの概略図

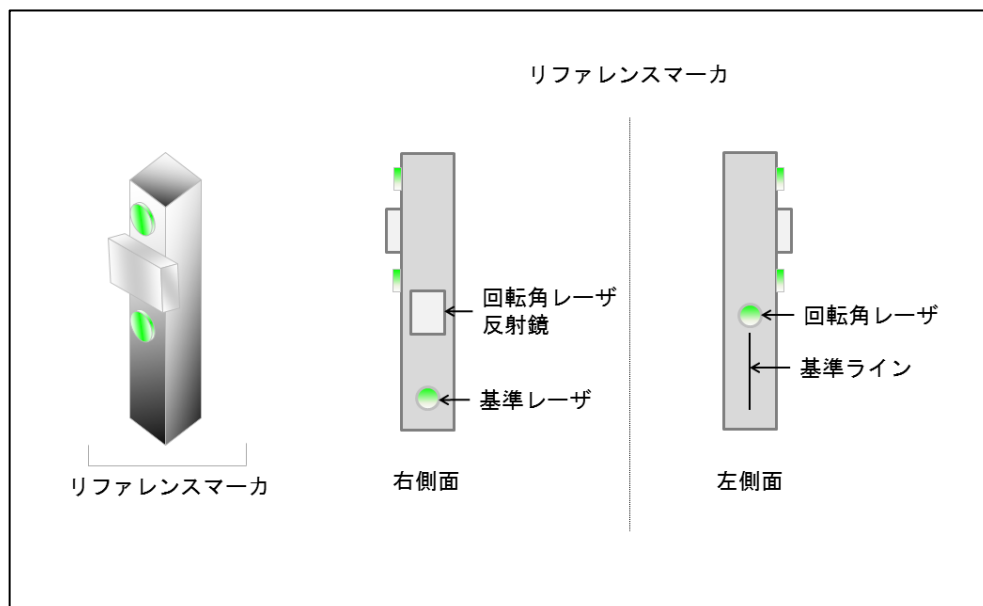


図 6-2 リファレンスマーカの詳細図

次に、姿勢情報取得システムについて検討する。ここでは、手動での移動を目的とした磁気計測システムとなるため、手動によるスタンド型移動装置に姿勢情報取得システムを搭載した、3章の試作機とほぼ同じ仕様のシンプルで安価な構成になる。搭載機器は回転角レーザ、受光用フィルタボックス、水準器、カメラ、カメラ映像と磁気計測データの送信機、駆動用バッテリー、三脚スタンドとなる。このスタンド型移動装置の部品コストは安価な市販品で製作可能である。これ以外に、通常の磁気計測でも必要な磁気センサと磁気データ収録用パソコンを準備する。このように、リファレンスマーカ、スタンド型移動装置ともにシンプルかつ安価での製造が可能である。これらの理由により、移動式磁気計測システムの実用化の第一歩として、手動によるスタンド型移動装置を用いた移動式磁気計測システムが最適であると考えられる。

6.3 ドローンを使用した移動式磁気計測システムの検討

次に、移動装置にドローンを使用した、移動式磁気計測システムの検討を行う。ここでは、6.2で述べたスタンド型移動装置をドローンに置き換え、簡易コントローラを用いた半自動での磁気計測の可能性を検討する。ここでコントローラは5.2で述べた簡易型球形コントローラとする。昇降、前後移動、左右移動、回転、静止と半自動での計測のため計測開始スイッチを持たせる。これにより、誰でも簡単にドローンを操作し磁気計測できるようにする。リファレンスマーカについては6.2と同じ仕様とする。ドローンに搭載する機器は回転角レーザ、受光用フィルタボックス、カメラ、カメラ映像、磁気計測データ、レーザ距離計データの送信機、レーザ距離計、磁気センサとなる。駆動用バッテリーはドローンと共有する。水準器については傾斜角センサを利用する。これまで使用してきた水準器は高精度

が得られるが、重さや大きさからドローンへの搭載は不向きである。また、ドローン自体に精度よく水平を保てる機能と能力があるが、本研究で必要な精度領域 0.01 度以下を安定して満たすことは難しい⁽²⁾。そこで、ドローンによる移動式磁気計測システムの実用化では、磁気センサの水平を傾斜角センサ使用して制御する。傾斜角センサの中でも容器内液体の傾斜による液面変化を静電容量変化としてとらえるセンサを採用する⁽³⁾。この傾斜計の角度分解能は大変に高く市販品であっても 0.001 度で水平情報を取得できる。ただし、高精度なタイプは傾斜の検知方向が一面のみの場合が多く、ZX 面と ZY 面での調整のために 2 個の搭載が必要となる。

ここでのドローンはゼロ点基準レーザと回転角レーザの光に合わせた自動制御を行う。図 4-6(a)のようにゼロ点基準レーザ光を画面上の基準ライン上に来るようにドローンを左右移動させ、その後水平を保つよう制御する。なお、この姿勢制御を完璧に制御することは高難度であり、またその必要もないので、測定場所においてゼロ点基準レーザが基準ライン上にあり、かつ傾斜角センサが水平を取った瞬間に、回転角レーザによる回転角情報と磁気計測データを取得する仕組みとする。これにより、ドローンの自動制御の精度を下げることができ、高度な制御技術⁽⁴⁾を用いなくとも磁気計測が実現できる。磁気センサを高速で移動させつつ連続的にすべてのデータを記録する場合には、常時正確な位置制御が必要となる。しかし、不発弾などの磁気分布測定では、あらかじめ測定場所を指定し、各指定位置に移動させながら、その場所で静止し磁気計測データを記録していくため、その必要はない。

磁気計測の手順としては、例えば不発弾の計測であれば目的地にリファレンスマーカを設置し、パソコン側にて測定開始距離と測定位置を決め、

姿勢情報取得システムの画面内に各レーザ光が入る位置までドローン进行操作して、測定開始スイッチを押す。そこからは自動制御となり測定位置毎に静止し、位置と姿勢を制御し正しい値になった時データ取得。その後、次の測定位置まで移動、これを距離 2m になるまで繰り返す。到達後は測定開始位置まで後退し着陸する。最低距離を 2m としたのは、距離が近くなるほど誤差が増えるためである。この仕組みでは測定開始位置にドローンを手で運び測定開始スイッチを押せば、人の手によるドローン操作はほぼ必要なくなるが、1 名での作業時などの作業効率も考慮し、簡易コントローラによる操作機能を持たせることとする。このシステムを用いることで不発弾探査のための磁気計測を誰でも簡単に実施することが可能になる。

6.4 結言

本章では、2章~5章で研究開発した簡易操作できる移動装置と画像処理を利用した移動式磁気計測システムの実用化に向けて、手動によるスタンド型移動装置と半自動制御によるドローン型移動装置について検討を行った。スタンド型移動装置による移動式磁気計測システムでは、ここまでの研究で試作がほぼ完了していることもあり、ローコスト化及び製品化を主眼に検討を実施した。今後は、デモンストレーション機を開発し、実用面でのさらなる改良を行い製品化に向けた評価試験を進める。半自動制御によるドローン型移動装置を用いた移動式磁気計測システムの検討では、実現のために必要となる水準器の入れ替えと性能確保のための制御方法の検討を行った。実用上で必要となる各要素を確認できたことで、今後の実用化にむけた提案が行えた。

参考文献

- [1] 航空貨物運送協会, 「航空貨物の梱包について－適切な梱包をご理解いただくために－」, 航空貨物運送協会 小冊子, 第3版, pp11-14, 2004
- [2] O. Bourquardez, R. Mahony, N. Guenard, F. Chaumette, T. Hamel and L. Eck “Image-Based Visual Servo Control of the Translation Kinematics of a Quadrotor Aerial Vehicle”, IEEE Trans. on Robotics, 25-3, pp.743-749, 2009
- [3] F. Kohsaka, J. Liang, T. Matsuo, and T. Ueda: “High Sensitive Tilt Sensor for Quarts Micromachining”, IEEJ Trans SM, Vol.127, No.10, pp.431-436, 2007
- [4] S. Azrad, F. Kendoul and K. Nonami “Visual Servoing of Quadrotor Micro-Air Vehicle Using Color-Based Tracking Algorithm”, Journal of System Design and Dynamics, 4-2, pp.255-268, 2010

第 7 章 結論

7.1 結論

本論文では、地磁気環境下での磁気計測精度の向上を行い、微弱な磁気領域において、磁気センサを移動させながら誰でも容易に計測できる、移動式磁気計測システムの開発を目的とした。第 2 章では磁気探査装置の都市部での誤検知問題について新しいフィルタリングを用いた解析手法を提案した、これにより磁気計測の精度を向上し、磁気センサ部の誤検知問題の改善を行った。不整地における探査作業について検討を行い、単一磁気センサによる移動式磁気計測手法に着目した。

第 3 章では単一の磁気センサによる移動式磁気計測手法の開発の第一歩として、移動式磁気計測システムを実現するために必要な機能の検討を行った。この検討に基づき、実験試作機を製作し目測によるレーザ測位実験を行い、目標となる磁気計測の精度を達成するために求められる姿勢情報取得機能の精度について明らかにした。

第 4 章では、3 章で得られた要求性能に基づいて姿勢情報取得システムの開発を行った。リファレンスマーカを利用した姿勢確認や反射鏡を用いた回転角レーザの S/N 比向上を提案し、これらに基づいて姿勢情報取得システム及び移動式磁気計測システムの試作機を製作した。試作機で得られる姿勢情報の精度を確認評価し、目標とした 10nT 分解能での磁気計測を実現するために必要な性能を有することを確認した。さらにその姿勢情報取得システムを用いて実際に移動式磁気計測システムによる磁気計測実験を行い、磁気計測の性能を確認した。第 5 章では、移動式の磁気計測システムの移動装置について検討した。移動装置の問題点となる容易な操作や直

感で操作できるコントローラを提案した。その実現のため、改良型のフレキシブルなタッチパネルスイッチの研究開発を行い、タッチパネルを試作し実機製作した。試作したタッチパネルを使って実際の改良の効果を確認した。

第 6 章では 2-5 章の研究を融合して得られた知見に基づき、移動式磁気計測システムの実用化に向けた提案を行った。手動移動によるセンサスタンド型とドローン型移動装置を用いた移動式磁気計測システムについて今後の実用化にむけた提案を行った。

以上のとおり、地磁気環境下での磁気計測精度の向上の確認と、移動式磁気計測システムの実用化に向けた研究を行った。

今後は、移動式磁気計測システムの実機を開発し、実際の運用によってさらに改良を進める必要がある。また、姿勢情報取得システムの受光フィルタボックスの軽量化と、入力範囲を維持しての小型化が望まれる。今回のレーザ光による姿勢情報取得システムでは距離 30m 程度まで高精度で回転角を認識できた。今後は不整地での不発弾探査の実運用を考慮し、一度に磁気計測できる距離を 50m 程度まで伸張することが望ましい。今回、単一の磁気センサによって不発弾探査可能なシステムを提案した。今後は、磁気の傾きから不発弾を解析する従来法に代わる、単一磁気センサで得られる絶対値の磁気計測データから不発弾検出する解析手法の検討が必要である。

謝辞

本論文をまとめる機会を与えていただき、ご多忙の中多くの時間を費やし懇切なご指導と有益な示唆を賜りました九州工業大学・大学院工学研究院電気電子工学研究系芹川聖一教授に心からの謝意を表します。本研究を遂行するにあたり有益なご助言とご指導をいただきました九州工業大学・大学院工学研究院電気電子工学研究系張力峰准教授に心よりの感謝をいたします。また、本論文をまとめるにあたり、有益なご助言をいただきました九州工業大学・大学院工学研究院電気電子工学研究系中藤良久教授ならびに九州工業大学・大学院工学研究院先端機能システム工学研究系竹沢昌晃教授に心より感謝いたします。本論文の作成にあたりご助力をいただいた北九州工業高等専門学校・情報システムコース北園優希准教授に心より感謝いたします。また、筆者が所属する株式会社エムティアイにおいて社会人学生を希望するにあたり、業務への影響は避けられない中、快く送り出していただいた百武英子顧問と坂井忠之電子部長に深く感謝いたします。最後に長きにわたり私を支えてくれた妻の親子に感謝をささげる次第です。